

Міністерство освіти і науки України
Чернігівський промислово-економічний коледж
Київського національного університету технологій та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з НР

_____ С.В.Бондаренко

_____ 20__ р.

**Методичні вказівки щодо організації
самостійної роботи студентів
з дисципліни Електричні машини
спеціальності 5.05070104 «Монтаж і експлуатація
електроустаткування
підприємств і цивільних споруд»**

Уклав

Ю. В. Алійник

Розглянуто на засіданні
циклової комісії
спеціальних електротехнічних
дисциплін
Протокол №__ від _____ 20__ року

Голова циклової комісії

В. В. Олійник

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Навчальна дисципліна "Електричні машини" входить до циклу професійно-орієнтованих дисциплін та є однією з найважливіших складових у системі підготовки студентів за спеціальністю 5.05070104 "Монтаж та експлуатація електроустаткування підприємств і цивільних споруд" .

Метою викладання курсу «Електричні машини» є придбання теоретичних і практичних знань процесів електромеханічного перетворення енергії. Предмети вивчення – електрична машина та трансформатор, що являють собою основну ланку в сучасній енергетичній установці. Теоретичною базою курсу «Електричні машини» є вища математика, фізика, теоретична механіка та теоретичні основи електротехніки (ТОЕ). Курс машин, використовуючи відомі закони електрики та магнетизму, відбиває їх на практиці, створюючи власну теорію цих машин. Вивчаючи будову і режими роботи електричних машин, необхідні також знання з інженерної графіки, електротехнічних матеріалів, прикладної механіки, промислової електроніки, з основ метрології та електричних вимірювань. В свою чергу курс «Електричні машини» є базовою дисципліною для вивчення наступних дисциплін: теорія електроприводу, елементи автоматизованого електропривода, електропостачання підприємств, електроустаткування, системи керування електроприводами.

ЦІЛІ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Головне завдання навчальної дисципліни:

- ознайомлення з загальними питаннями та призначенням електричних машин та трансформаторів;
- вивчення питань будови та принципу дії трансформаторів, безколекторних та колекторних машин, асинхронних та синхронних машин.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен знати: термінологію, яка застосовується в електромеханіці, принцип дії і будову різних типів електричних машин і трансформаторів; фізичні явища, що мають перебіг в електричних машинах і трансформаторах в різних режимах навантаження та їх математичний опис; основні характеристики електричних машин і трансформаторів; область використання електричних машин різних типів та конструктивного виконання.

Студент повинен вміти: вибирати електричні машини і трансформатори для конкретних умов практики; аналізувати і описувати перебіг стаціонарних процесів в системах, з електричними машинами і трансформаторами; виконувати розрахунки елементів конструкції при проектуванні та ремонті електричних машин та трансформаторів; - проводити дослідження електричних машин і трансформаторів; (вміти скласти схему дослідження, налагодження та технічне обслуговування і виконувати вимірювання в цій схемі).

Студент повинен мати навички: визначення типу машини, її потужності; аналізувати паспорт електричної машини та трансформатора для виконання в практиці.

РЕКОМЕНДАЦІ ЩОДО РОБОТИ СТУДЕНТІВ З ЛІТЕРАТУРОЮ

Опрацювання матеріалу потрібно починати з прочитання всього тексту, параграфу, дотримуючись таких правил:

- 1 Зосередитись на тім, що читаєш;
- 2 Виділити саму суттєвість прочитаного;
- 3 Мислити послідовно і обережно;
- 4 Уявити ясно те, що читаєш.

У процесі роботи над темою тлумачення незнайомих слів і спеціальних термінів знаходити в словнику іншомовних слів і у спеціальних довідниках з професії.

Незрозумілі місця, фрази, вирази перечитувати декілька раз, щоб зрозуміти їхній смисл.

У тексті зустрічаються окремі слова, фрази, або цілі речення, що виділені курсивом, жирним шрифтом, або набрані в розрядку. Це свідчить про акцент автора на основному.

Після прочитання тексту необхідно:

- 1 Виділити основні поняття та формули;
- 2 Усвідомити зв'язок між теоретичними положеннями і практичними розрахунками;
- 3 Закріпити прочитане у свідомості;
- 4 Пов'язати нові знання з попередніми у даній галузі;
- 5 Перейти до заключного етапу засвоєння і опрацювання -записам.

Записи необхідно починати з назви теми та посібника, прізвища автора, року видання та назви видавництва. Якщо це журнал, то рік і номер видання, заголовок статті. Після чого скласти план, тобто короткий перелік основних питань тексту в логічній послідовності теми.

Складання плану, або тез логічно закінченого по смислового змісту уривка тексту, сприяє кращому розумінню його. План може бути простий або розгорнутий, тобто більш поглиблений, особливо при опрацюванні додаткової літератури за даною темою.

Після складення плану необхідно перейти до текстування записів.

Записи необхідно вести розбірливо і чітко. Вони можуть бути короткі або розгорнуті залежно від рівня знань студента, багатства його літературної і професійно лексичної, навичок самостійної роботи з книгою. По мірі клопіткої і систематичної праці, записи повинні носити тезисний характер і бути логічно послідовними.

Для зручності користування записами необхідно залишати поля для заміток і вільні рядки для доповнень. В записах необхідно виділяти важливі місця, головні слова, які акцентуються різним шрифтом або різним кольором шрифтів, підкреслюванням, замітками на полях, рамками, стовпчиками тощо.

Записи можуть бути у вигляді конспекту, простих або розгорнутих тез, виписок, систематизованих таблиць, графіків, діаграм, схем, формул, визначень.

Конспект (лат. огляд) - це коротка, стисла, послідовно викладена за текстом універсальна форма запису основного змісту прочитаного, яка може супроводжуватись різними вищезгаданими записами.

Складання конспекту зводиться до коротких записів змісту кожного заголовку плану. Виділяючи основні думки, положення, підтвердження прикладами. Всі питання плану повинні бути пов'язані між собою.

Виписки використовуються за необхідності викладання найбільш важливих місць, фактів, цифрових даних, точного формулювання правил та законів.

Важливим елементом конспектування є вміння використовувати **ілюстровані роботи** (схеми, графіки, діаграми) і систематизовані **таблиці**. Основним недоліком у даному питанні є механічне виконання ілюстрацій, що не пов'язане з текстовим матеріалом.

Викладач повинен акцентувати увагу студентів на необхідності виконання та значенні графічних зображень і систематизованих таблиць, навчити їх самостійно складати, аналізувати і користуватись при теоретичних викладках матеріалу.

Складання тематичних графічних зображень і таблиць сприяє кращому засвоєнню однорідних явищ, дозволяє простежити за розвитком одного і того ж явища, тобто охопити увесь навчальний матеріал теми.

Систематизовані таблиці дозволяють студентам узагальнити набуті знання, аналізувати одержану інформацію.

Складання ілюстрованих матеріалів проявляє творчу і свідому активність студента до оволодіння знаннями, сприяє практичним умінням і навичкам до самостійної, вдумливої праці.

Навички конспектування виробляють уміння студента до написання рефератів.

Реферат (*лат.* докладувати, повідомляти) - це короткий виклад суттєвості змісту якої-небудь книги, теми, чи окремого питання прочитаного джерела.

Реферат викладають у вигляді вільного запису своїми словами, дотримуючись послідовності фактів згідно з джерелами і супроводжуючі текст виписками, ілюстративними матеріалами.

Необхідно привчити студентів користуватись великою кількістю джерел для написання реферату. Це дає можливість повноцінніше висвітлювати тему і навчитись зіставляти вислови, думки, цифрові дані різних авторів, років видання, що сприяє виробленню власної думки студента і є рушійним фактором до навичок елементів дослідницького мислення.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун
АТ – автотрансформатор
БДПС – безконтактний двигун постійного струму
БК – блок комутатора
ВН – висока напруга
ДПР – датчик положення ротора
ЕМП – електромагнітний підсилювач
ЕРС – електрорушійна сила
ІР – індукційний регулятор
КД – кроковий двигун
К.з. – коротке замикання
ККД – коефіцієнт корисної дії
КМ – колекторна машина
МРС – магніторушійна сила
НН – низька напруга
ОД – обмотка додаткових полюсів
ОЗ – обмотка збудження
ОК – обмотка компенсаційна
ОУ – обмотка управління
СГ – синхронний генератор
СД – синхронний двигун
СК – синхронний компенсатор
СМ – синхронна машина
СН – середня напруга
СРД – синхронний реактивний двигун
ФР – фазорегулятор
Х.х – холостий хід

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.
- 2 Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
- 3 Брускин Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1981.
- 4 Правила улаштування електроустановок. – Х. Вид-во «Форт», 2009. – 708с.
- 5 Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: издательский центр «Академия», 2005. – 408 с.
- 6 Сборник задач по электрическим машинам: Учебное пособие для студ. Учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 160 с.

Самостійна робота №1

Тема: Конструкція трансформаторів.

Мета: набуття студентами знань з принципу дії трансформаторів, їх конструкції та області застосування.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Типи магнітопроводів трансформаторів
- 2 Типи обмоток трансформаторів
- 3 Номінальні параметри трансформатора

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

1. З яких частин складається активна частина трансформаторів?
2. Які функції виконує магнітопровід?
3. З яких частин складається магнітопровід стержневого типу?
4. З яких частин складається магнітопровід броньового типу?
5. Опишіть стикова конструкція трансформатора.
6. Опишіть шихтовану конструкція трансформатора.
7. Які є види обмоток трансформаторів?
8. Яке призначення трансформаторного масла?
9. Назвіть номінальні параметри трансформатора. Як їх визначають?

1 Типи магнітопроводів трансформаторів

Сучасний трансформатор складається з різних конструктивних елементів: магнітопроводу, обмоток, ввідів, бака та ін. Магнітопровід з розміщеними на його стержнях обмотками становить *активну частину* трансформатора. Інші елементи трансформатора називають *неактивними* (допоміжними) частинами. Розглянемо докладніше конструкцію основних частин трансформатора.

Магнітопровід в трансформаторі виконує дві функції: по-перше, він становить магнітне коло, по якому замикається основний магнітний потік трансформатора, а по-друге, він призначений для установки й кріплення обмоток, відводів, перемикачів. Магнітопровід має шихтовану конструкцію, тобто він складається з тонких (зазвичай товщиною 0,5 мм) сталевих пластин, покритих із двох сторін ізолюючою плівкою (наприклад, лаком). Така конструкція магнітопроводу обумовлена прагненням послабити вихрові струми, що наводять у ньому змінним магнітним потоком, а отже, зменшити величину втрат енергії в трансформаторі.

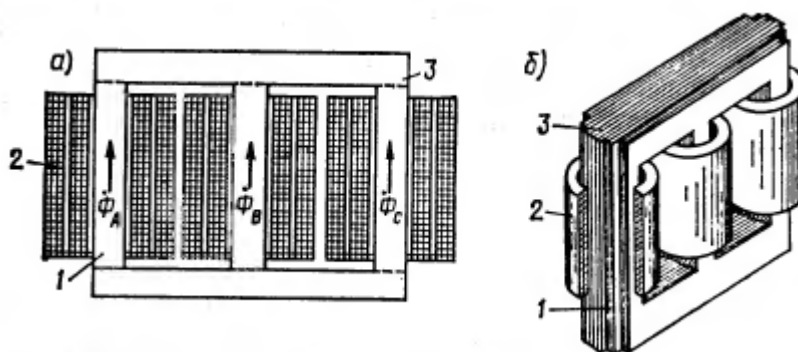
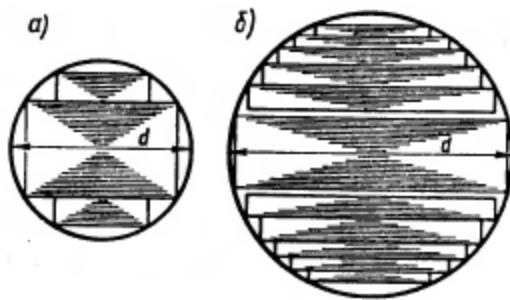


Рисунок 1.1 – Магнітопровід трифазного трансформатора стержневого типу з обмотками

Силкові трансформатори виконуються з магнітопроводами трьох типів: стержневого, броньового і бронестержневого.

В *магнітопроводі стержневого* типу (рисунок 1.1, а) вертикальні стержні 1, на яких розташовані обмотки 2, зверху й знизу замкнуті ярмами 3. На кожному стержні розташовані обмотки відповідної фази й проходить магнітний потік цієї фази: у крайніх стержнях – потоки Φ_A й Φ_C , а в середньому стержні – потік Φ_B . на рис. 1.2 б показаний зовнішній вигляд магнітопроводу. При цьому стержні мають ступінчастий переріз, який вписаний в коло діаметром d (рисунок 1.2). Стержні трансформаторів великої потужності мають багато ступенів, що забезпечує краще заповнення сталлю площі всередині обмотки. Для кращої тепловіддачі іноді між окремими пакетами стержня залишають повітряні зазори шириною 5-6 мм, що служать вентиляційними каналами.



а – трансформаторів малої й середньої потужності;
 б – трансформаторів великої потужності

Рисунок 1.2 – Форма перетину стержнів

Магнітопровід *броньового типу* являє собою розгалуджену конструкцію зі стержнем та ярмами, частково прикриваючими («бронюючими») обмотки (рис. 1.3). Магнітний потік у стержні магнітопроводу броньового типу у два рази більше, ніж у ярмах, кожне з яких має перетин, удвічі менше перетину стержня. Через технологічну складність виготовлення магнітопроводу броньового типу не одержали широкого поширення, їх застосовують лише в силових трансформаторах досить малої потужності (радіотрансформатори).

У трансформаторах великої потужності застосовують бронестержневу конструкцію магнітопроводу (рис. 1.4), що хоча й вимагає трохи більшої витрати електротехнічної сталі, але дозволяє зменшити висоту магнітопроводу ($H_{БС} \ll H_C$), а отже, і висоту трансформатора. Це має важливе значення при транспортуванні трансформаторів.

По способу суміщення стержнів з ярмами розрізняють стикову й шихтовану конструкції стержневого магнітопроводу (рис. 1.5).

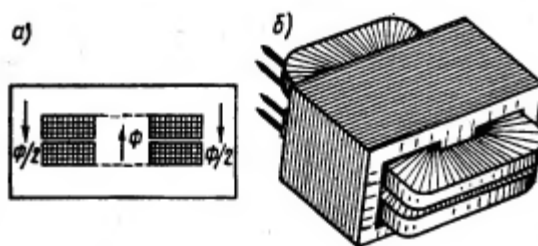


Рисунок 1.3 – Однофазний трансформатор броньового типу:
 а — конструкція; б — зовнішній вигляд

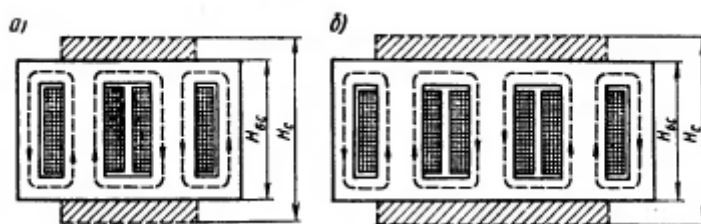


Рисунок 1.4 – Магнітопроводи бронестержневих трансформаторів:
 а – однофазного; б – трифазного

При *стиковій конструкції* (рис. 1.5, а) стержні і ярма збирають окремо, насаджують обмотки на стержні, а потім приставляють верхнє й нижнє ярма, задалегідь проклавши ізолюючі прокладки між елементами, що стикуються, з

метою ослаблення вихрових струмів, що виникають при взаємному перекритті листів стержнів й ярм. Після установки двох ярм всю конструкцію пресують і стягають вертикальними шпильками. Стикова конструкція хоча й полегшує зборку магнітопроводу, але не одержала поширення в силових трансформаторах через громіздкість стяжних пристроїв і необхідності механічної обробки поверхонь, що стикаються, для зменшення магнітного опору в місці стику.

Шихтована конструкція магнітопроводів силових трансформаторів показана на рис. 1.5 б, коли стержні і ярма збирають шарами в плетіння (переплет). Звичайно шар містить 2-3 листа. В наш час магнітопроводи силових трансформаторів виготовляють із холоднокатаної електротехнічної сталі, у якої магнітні властивості вздовж напрямку прокатки листів краще, ніж поперек. Тому при шихтованій конструкції в місцях повороту листів на 90° з'являються «зони розбіжності» напрямку прокатки з напрямком магнітного потоку. На цих ділянках спостерігається збільшення магнітного опору й ріст магнітних втрат. З метою ослаблення цього явища застосовують для шихтовки пластини (смуги) зі скошеними краями. У цьому випадку замість прямого стику (рис. 1.6, а) одержують косий стик (мал. 1.6, б), у якого «зона розбіжності» набагато менше.

Недоліком магнітопроводів шихтованої конструкції є деяка складність зборки, тому що для насадки обмоток на стержні доводиться розшихтовувати верхнє ярмо, а потім після насадки обмоток знову його зашихтовувати.

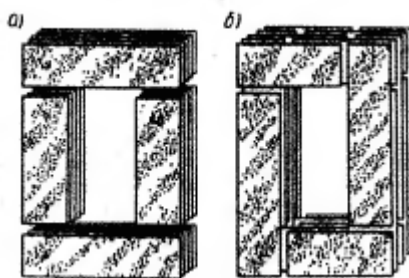


Рисунок 1.5 – Стикова (а) і шихтована (б) конструкції магнітопроводів

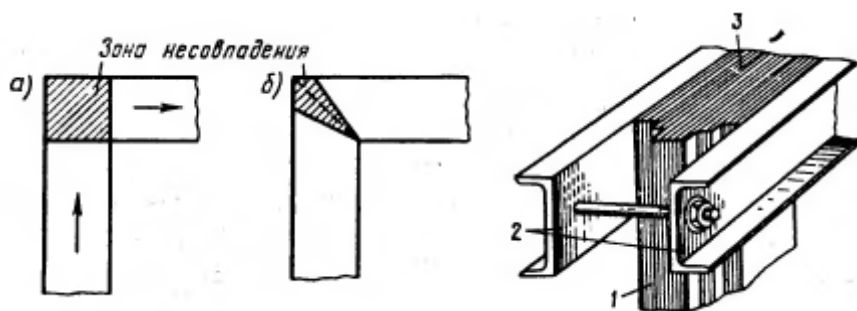


Рис. 1.6. «Зони розбіжності» при прямому (а) та косому (б) стику

Рис. 1.7 Опресування ярма

Стержні магнітопроводів, щоб уникнути розпушення, опресовують (скріплюють). Роблять це зазвичай накладенням на стержень бандажа зі склострічки або сталевого дроту. Сталевий бандаж виконують із ізолюючою пряжкою, що виключає створення замкнутих сталевих витків на стрижнях. Бандаж накладають рівномірно, з певним натягом. Для опресування ярем 3 і місць їхнього

з'єднання зі стержнями 1 використовують ярмові балки 2, які в місцях, що виходять за крайні стержні (рис. 1.7), стягають шпильками.

Щоб уникнути виникнення різниці потенціалів між металевими частинами під час роботи трансформатора, що може викликати пробій ізоляційних проміжків, що розділяють ці частини, магнітопровід і деталі його кріплення обов'язково заземлюють. Заземлення здійснюють мідними стрічками, що вставляють між сталевими пластинами магнітопроводу одними кінцями й прикріплюють до ярмових балок іншими кінцями.

Магнітопроводи трансформаторів малої потужності (звичайно потужністю не більше 1 кВ*А) найчастіше виготовляють із вузької стрічки електротехнічної холоднокатаної сталі шляхом навивки. Такі магнітопроводи роблять розрізними (рис. 1.8), а після насадки обмоток збирають встик і стягають спеціальними хомутами.

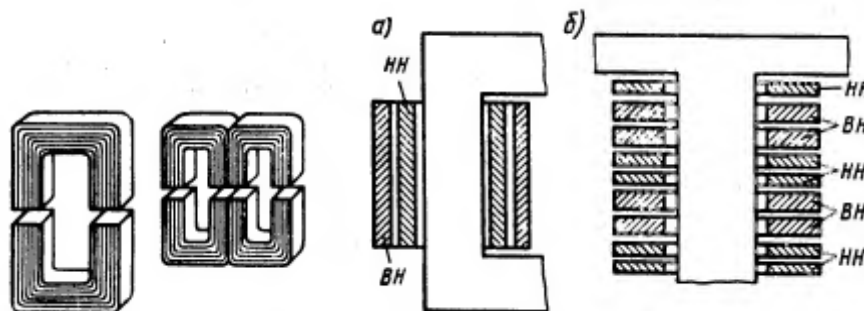


Рис. 1.8 – Стрічкові розрізні магнітопроводи

Рис. 1.9 – Концентрична (а) та дискова (б) обмотки трансформаторів

2 Типи обмоток трансформаторів

Обмотки трансформаторів середньої й великої потужності виконують із обмотувальних проводів круглого або прямокутного перетину, ізольованих бавовняною пряжею або кабельним папером. Основою обмотки в більшості випадків є паперово-бакелітовий циліндр, на якому кріпляться елементи (рейки, кутові шайби й т.п.), що забезпечують обмотці механічну й електричну міцність.

По взаємному розташуванню на стержні обмотки розділяють на концентричні й що чергуються. Концентричні обмотки виконують у вигляді циліндрів, розташовуваних на стержні концентрично: ближче до стержня зазвичай розташовують обмотку НН (потребуючу меншої ізоляції від стержня), а зовні – обмотку ВН (рис. 1.9, а).

Обмотки що чергуються (дискові) обмотки виконують у вигляді окремих секцій (дисків) НН і ВН і розташовують на стержні в порядку, що чергується (рис. 1.9, б). Обмотки, що чергуються, застосовують досить рідко, лише в деяких трансформаторах спеціального призначення.

Концентричні обмотки в конструктивному відношенні розділяють на кілька типів. Розглянемо деякі з них.

1. *Циліндричні* одношарові або двошарові обмотки із проводу прямокутного перетину (рис. 1.10, а) використовують головним чином як обмотки НН на номінальний струм до 800 А.

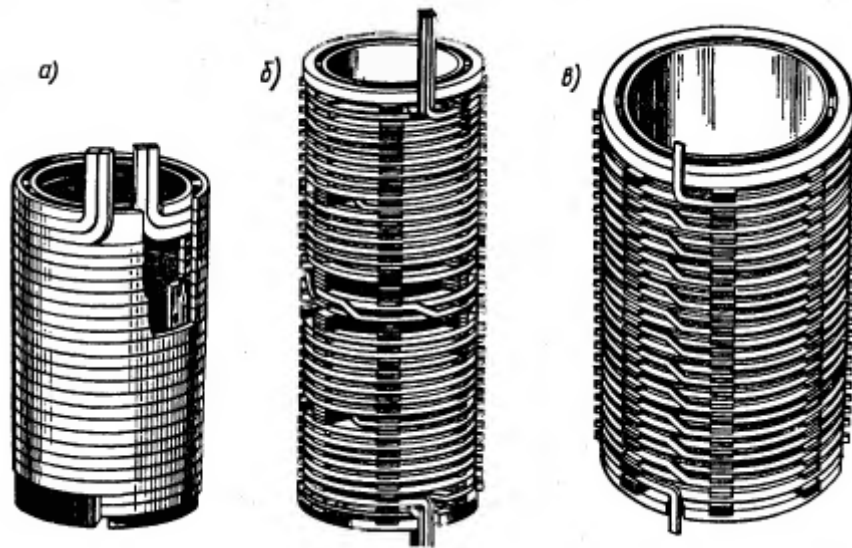


Рисунок 1.10 – Конструкція концентричних обмоток

2. *Гвинтові* одно - і багатоходові обмотки виконують із декількох паралельних проводів прямокутного перетину. При цьому витки укладають по гвинтовій лінії, що має один або кілька ходів (рис. 1.10, б). Для того щоб всі паралельні провідники однаково навантажувалися струмом, виконують *транспозицію* (перекладку) цих провідників. При транспозиції прагнуть, щоб у межах одного витка кожен провідник займав всі положення. Транспозиція може бути груповою (рис. 1.11, а), коли паралельні проводи діляться на дві групи й перестановка здійснюється групами, і загальною, коли міняється взаємне розташування всіх паралельних проводів (рис. 1.11 б).

3. *Безперервні обмотки* (рис. 1.10, в) складаються з окремих дискових обмоток (секцій), намотаних по спіралі й з'єднаних між собою без пайки, тобто виконаних «безперервно». Якщо обмотка виконується декількома паралельними проводами, то в ній застосовують транспозицію проводів. Безперервні обмотки, незважаючи на деяку складність виготовлення, отримали найбільше застосування в силових трансформаторах в якості як обмотки ВН, так й як обмотки НН. Це пояснюється їх великою механічною міцністю й надійністю.

У трансформаторах з масляним охолодженням магнітопровід з обмотками поміщений у бак, наповнений трансформаторним маслом (рис. 1.12). Трансформаторне масло, обмиваючи обмотки 2 й 3 і магнітопровід 1, відбирає від них теплоту й, маючи більш високу теплопровідність, чим повітря, через стінки бака 4 і труби радіатора 5 віддає її в навколишнє середовище.



Рисунок 1.11 – Транспозиція у гвинтових обмотках

Наявність трансформаторного масла забезпечує більш надійну роботу високовольтних трансформаторів, тому що електрична міцність масла набагато вище, ніж повітря. Масляне охолодження інтенсивніше повітряного, тому габарити

й вага масляних трансформаторів менше, ніж у сухих трансформаторів такої ж потужності.

У трансформаторах потужністю до 30 кВ*А застосовують баки із гладкими стінками. У більш потужних трансформаторів для збільшення охолоджуваної поверхні стінки бака роблять ребристими або ж застосовують трубчасті баки. Масло, нагріваючись, піднімається нагору, а охолоджуючись, опускається вниз. При цьому масло циркулює в трубах, що сприяє більш швидкому його охолодженню.

Для компенсації обсягу масла при зміні температури, а також для захисту масла від окислювання й зволоження при контакті з повітрям у трансформаторах застосовують розширювач, що представляє собою циліндричну посудину, яка встановлена на кришці бака й сполучена з ним. Коливання рівня масла зі зміною його температури відбуваються не в баці, що завжди заповнений маслом, а в розширювачі, що сполучений з атмосферою.

У процесі роботи трансформаторів не виключена можливість виникнення в них явищ, що супроводжуються бурхливим виділенням газів, що веде до значного збільшення тиску усередині бака, тому, щоб уникнути пошкодження баків трансформатори потужністю 1000 кВ*А й вище оснащують вихлопною трубою, яку встановлюють на кришці бака. Нижнім кінцем труба з'єднана з баком, а її верхній кінець закінчується фланцем, на якому закріплений скляний диск. При тиску, що перевищує безпечне значення для бака, скляний диск лопається й гази виходять назовні.

У трубопроводі, що з'єднує бак масляного трансформатора з розширювачем, поміщене газове реле. При виникненні в трансформаторі значних ушкоджень, супроводжуваних сильним виділенням газів (наприклад, при короткому замиканні між витками обмоток), газове реле спрацьовує й замикає контакти ланцюга управління вимикача, що відключає трансформатор від мережі. Обмотки трансформатора із зовнішнім колом з'єднують вводами 7 й 8. У масляних трансформаторах для вводів звичайно використовують прохідні порцелянові ізолятори.

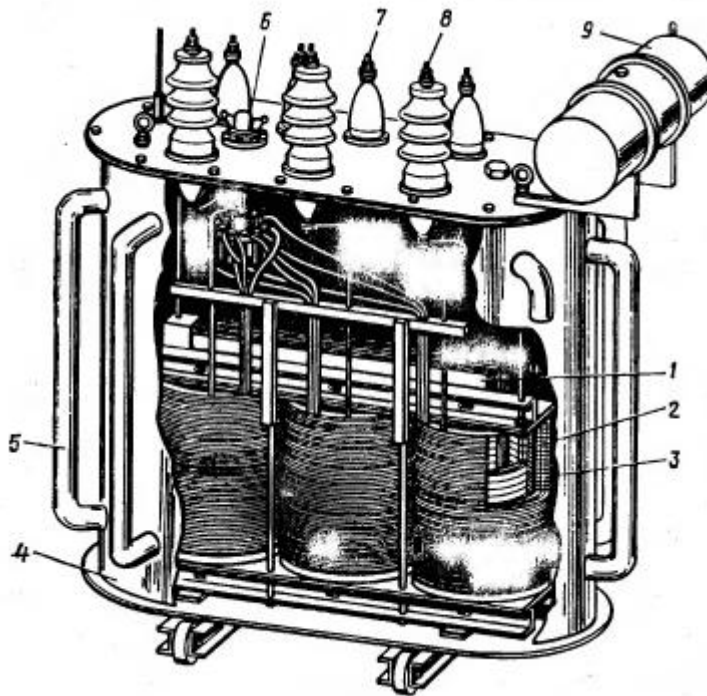


Рисунок 1.12 – Конструкція трансформатора з масляним охолодженням

Такий ввід оснащений металевим фланцем, за допомогою якого він кріпиться до кришки або стінки бака. До дна бака прикріплений візок, що дозволяє переміщати трансформатор у межах підстанції. На кришці бака розташована рукоятка перемикача напруг б.

3 Номінальні параметри трансформатора

Технічні дані трансформатора визначаються його *номінальними параметрами*:

- 1) номінальна первинна лінійна напруга $U_{1ном}$, В або кВ;
- 2) номінальна вторинна лінійна напруга $U_{2ном}$ (напруга на виводах вторинної обмотки при відключеному навантаженні й номінальній первинній напрузі), В або кВ;
- 3) номінальні лінійні струми в первинній $I_{1ном}$ и вторинній $I_{2ном}$ обмотках, А;
- 4) номінальна повна потужність $S_{ном}$, кВ*А (для однофазного трансформатора $S_{ном}=U_{1ном} I_{1ном}$, для трифазного $S_{ном}=\sqrt{3}*U_{1ном} I_{1ном}$). В зв'язку з тим, що втрати потужності в трансформаторах невеликі, то прийнято вважати номінальну напругу в колі первинної обмотки приблизно рівною номінальній повній потужності в колі вторинної обмотки:

$$S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном} \approx U_{2ном} I_{2ном}.$$

Номінальні лінійні струми обчислюють по номінальній потужності трансформатора: для трифазного трансформатора

$$I_{1ном} = (S_{ном} * 10^3) / (\sqrt{3} * U_{1ном}); I_{2ном} = (S_{ном} * 10^3) / (\sqrt{3} * U_{2ном}),$$

де $S_{ном}$ – номінальна потужність трифазного трансформатора, кВ*А.

Кожен трансформатор розрахований для включення в мережу перемінного струму певної частоти. В Україні трансформатори загального призначення розраховані на частоту $f = 50$ Гц (у деяких інших країнах $f = 60$ Гц), у засобах автоматики й зв'язку застосовують трансформатори на частоти 50, 400 або 1000 Гц.

Приклад 1.1. Номінальні значення первинної й вторинної напруг однофазного трансформатора $U_{1ном} = 110$ кВ, $U_{2ном} = 6.3$ кВ, номінальний первинний струм $I_{1ном} = 95,5$ А. Визначити номінальну потужність трансформатора $S_{ном}$ і номінальний вторинний струм $I_{2ном}$.

Рішення.

Номінальна потужність трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном} = 110 * 95,5 = 10500$ кВА.

Номінальний вторинний струм $I_{2ном} = S_{ном} / U_{2ном} = 105000 / 6,3 = 1666$ А.

Самостійна робота №2

Тема: Приведення параметрів вторинної обмотки ТР та схема заміщення. Векторна діаграма ТР.

Мета: ознайомитися з основними рівняннями та схемою заміщення приведенного трансформатора; вивчити порядок побудови векторної діаграми

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Приведення параметрів вторинної обмотки й схема заміщення приведенного трансформатора
- 2 Векторна діаграма трансформатора

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Як отримати приведений трансформатор?
- 2 Запишіть рівняння напруг та струмів для приведенного трансформатора.
- 3 Побудуйте еквівалентну схему та схему заміщення приведенного трансформатора.
- 4 Побудуйте векторну діаграму трансформатора та опишіть порядок її побудови.

1 Приведення параметрів вторинної обмотки й схема заміщення приведенного трансформатора

У загальному випадку параметри первинної обмотки трансформатора відрізняються від параметрів вторинної обмотки. Ця різниця найбільш відчутна при більших коефіцієнтах трансформації, що утрудняє розрахунки й побудову векторних діаграм, тому що в цьому випадку вектори електричних величин первинної обмотки значно відрізняються по своїй довжині від однойменних векторів вторинної обмотки. Зазначені утруднення усуваються приведенням всіх параметрів трансформатора до однакового числа витків, звичайно до числа витків первинної обмотки w_1 . Із цією метою всі величини, що характеризують вторинний ланцюг трансформатора, — ЕРС, напруга, струм й опори — перераховують на число витків w_1 первинної обмотки.

Таким чином, замість реального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $k=w_1/w_2$ одержують еквівалентний трансформатор з $k=w_1/w'_2=1$, де $w'_2=w_1$. Такий трансформатор називають *наведеним*. Однак приведення вторинних параметрів трансформатора не повинне відбитися на його енергетичних показниках: всі потужності й фазові зрушення у вторинній обмотці наведеного трансформатора повинні залишитися такими, як й у реальному трансформаторі.

Так, електромагнітна потужність вторинної обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ повинна бути дорівнює електромагнітній потужності вторинної обмотки наведеного трансформатора:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2. \quad (1.27)$$

Підставивши значення наведеного струму вторинної обмотки $I_2 = I_2(w_2/w_1)$ в (1.27), одержимо формулу наведеної вторинної ЕРС:

$$E'_2 = \frac{I_2}{I'_2} E_2 = \frac{I_2}{I_2} \frac{w_1}{w_2} E_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.28)$$

Тому що $U_2 I_2 \approx U'_2 I'_2$, та наведена напруга вторинної обмотки

$$U'_2 \approx U_2 (w_1 / w_2). \quad (1.29)$$

З умови рівності втрат в активному опорі вторинної обмотки маємо $I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2$. Визначимо наведений активний опір:

$$r'_2 = r_2 (I_2 / I'_2)^2 = r_2 (w_1 / w_2)^2. \quad (1.30)$$

Наведений індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки визначають із умови рівності реактивних потужностей $I_2^2 x_2 = I'^2_2 x'_2$, звідки

$$x'_2 = x_2 (w_1 / w_2)^2. \quad (1.31)$$

Наведений повний опір вторинної обмотки трансформатора

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2 = (r_2 + jx_2)(w_1 / w_2)^2 = Z_2 (w_1 / w_2)^2. \quad (1.32)$$

Наведений повний опір навантаження, підключеної на висновки вторинної обмотки, визначимо за аналогією з (1.32):

$$Z'_n = Z_n (w_1 / w_2)^2. \quad (1.33)$$

Рівняння напруг і струмів для наведеного трансформатора мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned} \quad (1.34)$$

Ці рівняння встановлюють аналітичний зв'язок між параметрами трансформатора у всьому діапазоні навантажень від режиму х.х. до номінальної.

Ще одним засобом, що полегшує дослідження електромагнітних процесів і розрахунків трансформаторів, є застосування електричної *схеми заміщення наведеного трансформатора*. На мал. 1.18, а представлена еквівалентна схема наведеного трансформатора, на якій опору r і x

умовно винесені з відповідних обмоток і включені послідовно їм. Як було встановлено раніше, у наведеному трансформаторі $k = 1$, а тому $-\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$. У результаті крапки A і a , а також крапки X і x на схемі мають однакові потенціали, що дозволяє електрически з'єднати зазначені крапки, одержавши Т-подібну схему заміщення наведеного трансформатора (рисунок 2.1, б). В електричній схемі заміщення трансформатора магнітний зв'язок між колами замінена електричною.

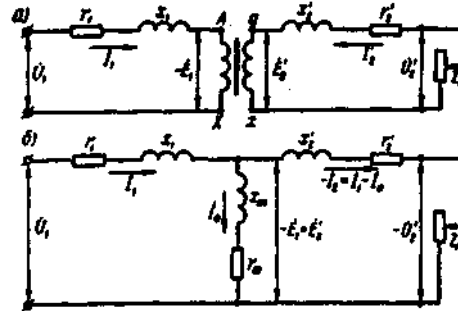


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема (в) і схема заміщення (б) наведеного

Схема заміщення наведеного трансформатора задовольняє всім рівнянням ЕРС і струмів наведеного трансформатора (1.34) і являє собою сукупність трьох галузей: *первинної* — опором $Z_1 = r_1 + jx_1$ і струмом I_1 ; що *намагнічує* — опором $Z_m = r_m + jx_m$ і струмом I_0 ; *вторинної* — із двома опорами: опором властиво вторинної галузі $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ й опором навантаження $Z' = r'_n \pm jx'_n$ і струмом $-I_2$. Зміною опору навантаження Z' на схемі заміщення можуть бути відтворені всі режими роботи трансформатора.

Параметри галузі намагнічування $Z_m = r_m + jx_m$ визначаються струмом х.х. Наявність у цій вітці активної складової r_m обумовлено магнітними втратами в трансформаторі.

Всі параметри схеми заміщення, за винятком Z' , є постійними для даного трансформатора й можуть бути визначені з досліду х.х. і досліду к. з..

2 Векторна діаграма трансформатора

Скориставшись схемою заміщення наведеного трансформатора й основних рівнянь напруг і струмів (1.34), побудуємо векторну діаграму трансформатора, що наочно показує співвідношення й фазові зрушення між струмами, ЕРС і напругами трансформатора. Векторна діаграма - графічне вираження основних рівнянь наведеного трансформатора (1.34).

Побудова діаграми (рисунок 2.2, а) варто починати з вектора максимального значення основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_{\max} = E_1 / (4,44 f \omega_1)$.

Вектор струму I_0 випереджає по фазі вектор потоку $\dot{\Phi}_{\max}$ на кут δ , а вектори ЕДС \dot{E}_1 , і \dot{E}'_2 відстають від цього вектора на кут 90° . Далі будуємо вектор \dot{I}'_2 . Для визначення кута зрушення фаз між \dot{E}'_2 і \dot{I}'_2 треба знати характер навантаження. Припустимо, що навантаження трансформатора активно-індуктивна. Тоді вектор \dot{I}'_2 відстає по фазі від \dot{E}'_2 на кут обумовлений як характером зовнішнього навантаження, так і власними опорами вторинної обмотки.

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_n}{r'_2 + r'_n}, \quad (1.35)$$

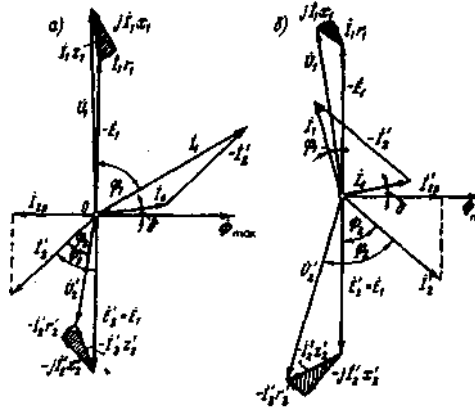


Рисунок 2.2 – Векторні діаграми трансформатора при активно-індуктивній (а) і активно-ємнісній (б) навантаженнях

Для побудови вектора вторинної напруги \dot{U}'_2 необхідно з вектора ЕРС \dot{E}'_2 відняти вектори спадань напруги $j\dot{I}'_2 x'_2$ й $\dot{I}'_2 r'_2$. Із цією метою з кінця вектора \dot{E}'_2 опускаємо перпендикуляр на напрямок вектора струму \dot{I}'_2 й відкладаємо на ньому вектор $-j\dot{I}'_2 x'_2$. Потім проводимо пряму, паралельну \dot{I}'_2 , і на ній відкладаємо вектор $-\dot{I}'_2 r'_2$. Побудувавши вектор $-\dot{I}'_2 Z'_2$, одержимо трикутник внутрішніх спадань напруги у вторинному ланцюзі. Потім із точки *Про* проводимо вектор $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$, що випереджає по фазі струм \dot{I}'_2 на кут $\varphi_2 = \arctg(x'_2/r'_2)$.

Вектор первинного струму будуюмо як векторну суму: $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$. Вектор $-\dot{I}'_2$ проводимо з кінця вектора \dot{I}_0 протилежно вектору \dot{I}'_2 . Побудуємо вектор $\dot{U}_1 = -\dot{E}'_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$, для чого до вектора $-\dot{E}'_1$, що випереджає по фазі вектор потоку Φ_{\max} на 90° , додаємо вектори внутрішніх спадань напруги первинної обмотки: вектор $\dot{I}_1 r_1$, паралельний току \dot{I}_1 , і вектор $j\dot{I}_1 x_1$, що випереджає вектор струму \dot{I}_1 на кут 90° . З'єднавши точку *О* з кінцем вектора $\dot{I}_1 Z_1$, одержимо вектор \dot{U}_1 , що випереджає по фазі вектор струму \dot{I}_1 , на кут φ_1 .

Іноді векторну діаграму трансформатора будують із метою визначення ЕРС обмоток. У цьому випадку заданими є параметри вторинної обмотки: U_2 , I_2 і $\cos\varphi_2$. Знаючи w_1/w_2 , визначають \dot{U}'_2 й \dot{I}'_2 а потім будують вектори цих величин під фазовим кутом φ_2 друг до друга. Вектор ЕРС $\dot{E}'_2 = \dot{E}'_1$ одержують геометричним додаванням вектора напруги \dot{U}'_2 зі спаданнями напруги у вторинній обмотці:

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}'_2 r'_2.$$

У випадку активно-ємнісного навантаження векторна діаграма трансформатора має вигляд, показаний на рисунку 2.2, б. Порядок побудови діаграми залишається колишнім, але вид її трохи змінюється. Струм \dot{I}'_2 у цьому випадку випереджає по фазі ЕРС \dot{E}'_2 на кут

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 - x'_n}{r'_2 + r'_n}. \quad (1.36)$$

При значній ємнісній складовій навантаження спадання напруги в ємнісній складовій опори навантаження й індуктивне спадання напруги розсіювання у вторинній обмотці частково компенсують один одного. У результаті напруга \dot{U}'_2 може виявитися більше, ніж ЕРС \dot{E}'_2 . Крім того, реактивна (випереджальна) складова вторинного струму $\dot{I}'_{2p} = \dot{I}'_2 \sin\psi_2$ збігається по фазі з реактивної складової струму х.х. \dot{I}'_{0p} , тобто робить на магнітопровод трансформатора *подмагничшающее* дія.

Це веде до зменшення первинного струму I_1 , у порівнянні з його значенням при активно-індуктивному навантаженні, коли складова I'_{2p} впливає (рисунок 2.2, а).

Самостійна робота №3

Тема: Явища при намагнічуванні магнітопроводів. Вплив схеми з'єднання на роботу ТР.

Мета: вивчити порядок побудови графіку намагнічуючого струму трансформатора; ознайомитися з впливом різних схем з'єднання обмоток ТР на його роботу.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Явища при намагнічуванні магнітопроводів трансформаторів
- 2 Вплив схеми з'єднання обмоток на роботу трифазних трансформаторів у режимі холостого ходу

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Опишіть порядок побудови графіку намагнічуючого струму.
- 2 Побудуйте графік намагнічуючого струму.
- 3 Як впливають різні схеми з'єднання обмоток на роботу ТР?

1 Явища при намагнічуванні магнітопроводів трансформаторів

Припустимо, що до первинної обмотки трансформатора підведена синусоїдальна напруга. При цьому потік у магнітопроводі також буде синусоїдальним: $\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$. Однак, внаслідок насичення магнітний потік трансформатора не пропорційний струму, що намагнічує. Тому при синусоїдальному потоці Φ струм, що намагнічує, є несинусоїдальним. Для визначення форми кривої цього струму $i_{0p} = f(t)$ скористаємося кривою намагнічування магнітопровода $\Phi = f(i_{0p})$ і графіком зміни потоку $\Phi = f(t)$.

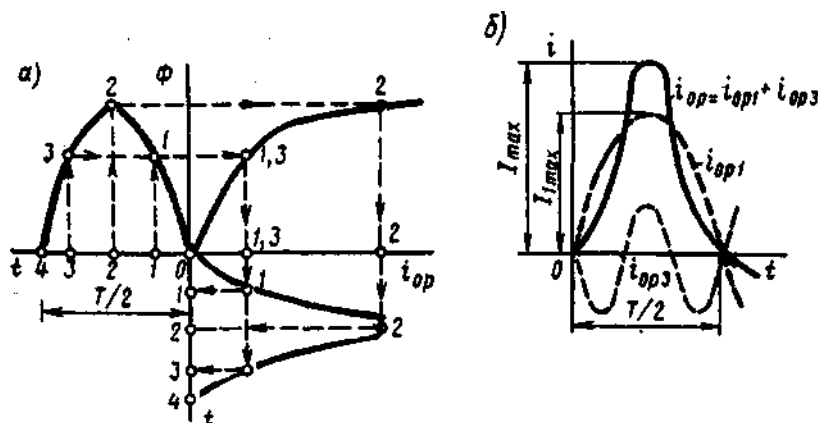


Рисунок 1.23 – Побудова графіка намагнічуючого струму (а) і розкладання його на складові (б)

На рисунку 1.23, а дана побудова графіка струму, що намагнічує, $i_{0p} = f(t)$. Тут у лівому верхньому квадранті показана синусоїдальна крива $\Phi = f(t)$, а у верхньому правому квадранті — крива намагнічування $\Phi = f(i_{0p})$ матеріалу магнітопровода. Для одержання графіка струму, що намагнічує, $i_{0p} = f(t)$, розташованого в правому нижньому квадранті, надходять у такий спосіб. На графіку $\Phi = f(t)$ вибирають ряд точок 1, 2, 3, проєктують їх на криву намагнічування й визначають значення струму, що намагнічує, відповідним обраним значенням магнітного потоку. Потім проводять вертикальні лінії через крапки 1, 2, 3 на осі i_{0p} у правий нижній квадрант до перетинання з горизонтальними лініями, проведеними із крапок 1, 2, 3 на осі часу цього квадранта, і одержують геометричне місце крапок кривої струму, що намагнічує, $i_{0p} = f(t)$. Зі зроблених побудов видно, що при синусоїдальній формі кривої $\Phi = f(t)$ струм, що намагнічує, має шпильясту форму. З метою спрощення побудов у цьому випадку скористалися кривою намагнічування $\Phi = f(i_{0p})$, побудованої без обліку гістерезису.

Після розкладання несинусоїдальної кривої струму i_{0p} на синусоїдальні складові (рисунок 1.23, б) видно, що в цьому струмі крім основної (першої) гармоніки i_{0p1} яскраво виражена третя гармоніка i_{0p3} .

Так, у трансформаторі з магнітопроводом з високолегованої сталі при індукції $B=1,4$ Тл амплітуда третьої гармоніки становить приблизно 30% амплітуди основної гармоніки струму, що намагнічує. Сказане відноситься лише до реактивної складової струму х.х., бо активна складова i_{0a} є синусоїдальною. Звичайно i_{0a} не перевищує 10% від I_0 , тому з деяким наближенням можна прийняти, що крива струму х.х. $i_{0p} = f(t)$ не відрізняється від кривої $i_{0p} = f(t)$.

2 Вплив схеми з'єднання обмоток на роботу трифазних трансформаторів у режимі холостого ходу

З рівнянь струмів третьої гармоніки в трифазній системі видно, що ці струми в будь-який момент часу збігаються по фазі, тобто мають однаковий напрям.

$$\left. \begin{aligned} i_{A3} &= I_{3\max} \sin 3\omega t; \\ i_{B3} &= I_{3\max} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t; \\ i_{C3} &= I_{3\max} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t; \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

Цей же висновок поширюється на всі вищі гармоніки струму, кратні трьом, - 3, 9, 15 і т.д. Ця обставина впливає на процеси, що супроводжують намагнічування сердечників при трансформуванні трифазного струму.

Розглянемо особливості режиму холостого ходу трифазних трансформаторів для деяких схем сполуки обмоток.

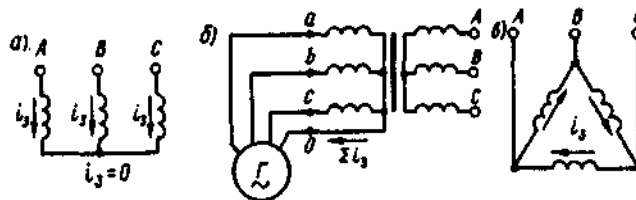


Рисунок 1.24 – Напрямок струмів третьої гармоніки для різних схем сполуки обмоток

Сполука Y/Y₀. Якщо напруга підводить із боку обмоток, з'єднаних зіркою без нульового висновку (рисунок 1.24, а), то струми третьої гармоніки (і кратні трьом — 9, 15 і т.д.), збігаються по фазі у всіх трьох фазах, будуть дорівнюють нулю. Порозумівається це відсутністю нульового проведення, а отже, відсутністю виходу з нульової крапки. У підсумку струми третьої й кратні трьом гармоніки будуть взаємно компенсуватися й струм, що намагнічує, трансформатора виявиться синусоїдальним, але магнітний потік у магнітопроводі виявиться несинусоїдальним (сплюсненим) з явно вираженим потоком третьої гармоніки Φ_3 (рисунок 1.25).

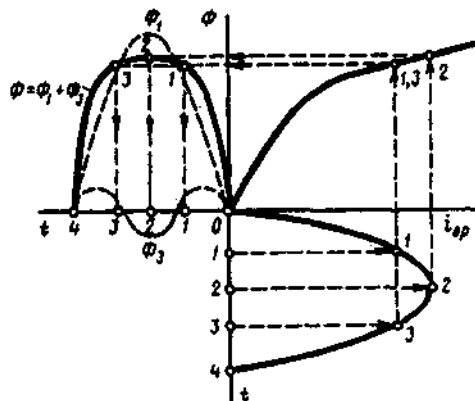


Рисунок 1.25 – Побудова графіка магнітного потоку при синусоїдальній формі струму, що намагнічує

Потоки третьої гармоніки не можуть замкнуті в трьохстержневом магнітопроводі, тому що вони збігаються по фазі, тобто спрямовані зустрічно. Ці потоки замикаються через повітря (масло) і металеві стінки бака (рисунок 1.26). Великий магнітний опір потоку Φ_3 послабляє його величину, наводи тому потоками Φ_3 у фазних обмотках ЕРС третьої гармоніки невелика й звичайно їхня амплітуда не перевищує 5—7% від амплітуди основної гармоніки. На практиці потік Φ_3 урахувують лише з погляду втрат від вихрових струмів, індукуються цим потоком у стінках бака. Наприклад, при індукції в стрижні магнітопровода порядку 1,4 Тл втрати від вихрових струмів у баці становлять близько 10% від втрат у магнітопроводі, а при індукції 1,6 Тл ці втрати зростають до 50 - 65%.

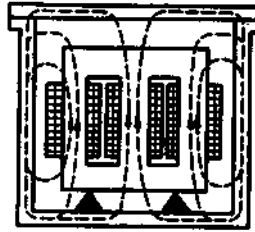


Рисунок 1.26 – Шляхи замикання магнітних потоків третьої гармоніки в трехстержневом магнітопроводі

У випадку трансформаторної групи, що складає із трьох однофазних трансформаторів (див. мал. 1.20, а), магнітопроводи окремих фаз магнітно не зв'язані, тому магнітні потоки третьої гармоніки всіх трьох фаз безперешкодно замикаються (потік кожної фази замикається у своєму магнітопроводі). При цьому значення потоку Φ_3 може досягати 15 — 20% від Φ_1 . Несинусоїдальний магнітний потік Φ , що містить крім основної гармоніки Φ_1 ще й третю Φ_3 ,

$$\Phi = \Phi_1 \sin \omega t + \Phi_3 \sin 3 \omega t \quad (1.38)$$

наводить у фазних обмотках несинусоїдальну ЕДС

$$e = -w d\Phi / dt = \omega w \Phi_1 \sin(\omega t - \pi/2) + 3 \omega w \Phi_3 \sin(3 \omega t - \pi/2) = e_1 + e_3 \quad (1.39)$$

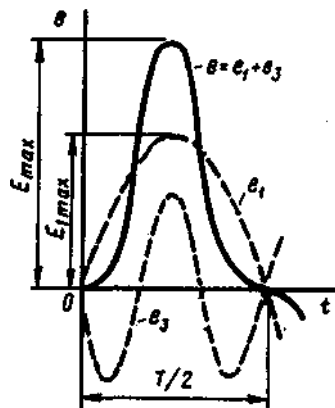


Рисунок 1.27 – Форма графіка фазної ЕРС трансформаторної групи при сполуці обмоток Y/Y

Підвищена частота 3ω магнітного потоку Φ_3 приводить до появи значної ЕРС e_3 , що різко збільшує амплітудне значення фазної ЕРС обмотки при тій же її діючому значенні (мал. 1.27), що створює несприятливі умови для електричної ізоляції обмоток.

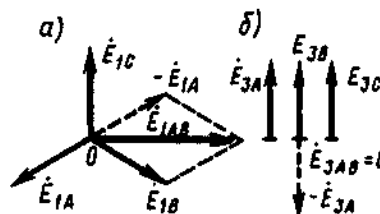


Рисунок 1.28 – Векторні діаграми ЕДС основної (а) і третьої (б) гармонік трифазного трансформатора

Амплітуда ЕРС третьої гармоніки в трансформаторній групі може досягати 45—65% від амплітуди основної гармоніки. Однак слід зазначити, що лінійні ЕРС (напруги) залишаються синусоїдальними й не містять третьої гармоніки, тому що при сполуці обмоток зіркою фазні ЕРС e_{3A} , e_{3B} й e_{3C} збігаються по фазі,

не створюють лінійної ЕРС. Порозумівається це тим, що лінійна ЕРС при сполучі обмоток зіркою визначається різницею фазних ЕРС. Так, для основної гармоніки (мал. 1.28, а) лінійна ЕРС

$$\dot{E}_{1AB} = -\dot{E}_{1A} + \dot{E}_{1B} = \sqrt{3}\dot{E}_{1A}.$$

Що ж стосується лінійної ЕРС третьої й кратних трьом гармонік, то через збіг по фазі фазних ЕРС цих гармонік (мал. 1.28, б) одержимо

$$\dot{E}_{3AB} = \dot{E}_{3B} - \dot{E}_{3A} = 0.$$

Якщо первинна обмотка трансформатора є обмоткою НН й її нульовий висновок приєднаний до нульового висновку генератора (див. мал. 1.24, б), то струми, що намагнічують, фаз містять треті гармоніки. Ці струми збігаються по фазі [див. (1.37)], а тому всі вони спрямовані або від трансформатора до генератора, або навпаки. У нульовому проведенні буде протікати струм, рівний $3i_3$, при цьому магнітний потік трансформатора, а отже, і ЕРС у фазах будуть синусоїдальні.

Сполуки, при яких обмотки якої-небудь сторони трансформатора (НН або ВН) з'єднані в трикутник. Ці схеми сполуки найбільш бажані, тому що вони позбавлені недоліків розглянутих раніше схем.

Допустимо, що в трикутник з'єднані первинні обмотки трансформатора. Тоді струм третьої гармоніки безперешкодно замикається в замкнутому контурі фазних обмоток, з'єднаних у трикутник (див. мал. 1.24, в). Але якщо струм, що намагнічує, містить третю гармоніку, те магнітні потоки в стрижнях, а отже, і ЕРС у фазах практично синусоїдальні.

Якщо ж вторинні обмотки трансформатора з'єднані в трикутник, а первинні — у зірку, то ЕРС третьої гармоніки, наведені у вторинних обмотках, створюють у замкнутому контурі трикутника струм третьої гармоніки. Цей струм створює в магнітопроводі магнітні потоки третьої гармоніки Φ_{23} , спрямовані зустрічно потокам третьої гармоніки від струму, що намагнічує, Φ_{13} (за правилом Ленца). У підсумку результуючий потік третьої гармоніки $\dot{\Phi}_{рез3} = \dot{\Phi}_{13} - \dot{\Phi}_{23}$ значно послабляється й практично не впливає на властивості трансформаторів.

Самостійна робота №4

Тема: Спрощена векторна діаграма і зовнішня характеристика ТР.

Мета: ознайомитися з порядком побудови спрощеної векторної діаграми та зовнішньої характеристики ТР.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Спрощена векторна діаграма трансформатора
- 2 Зовнішня характеристика трансформатора

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Навіщо будується спрощена векторна діаграма ТР?
- 2 Опишіть порядок побудови спрощеної векторної діаграми ТР.
- 3 Для чого використовуються зовнішні характеристики ТР?
- 4 Дайте визначення поняття зовнішня характеристика ТР.
- 5 Побудуйте зовнішню характеристику ТР.

1 Спрощена векторна діаграма трансформатора

Векторна діаграма навантаженого трансформатора наочно показує співвідношення між параметрами трансформатора. Через складність ця діаграма не може бути використана для практичних розрахунків. Для спрощення діаграми й надання їй практичного значення в силових трансформаторах, що працюють із навантаженням, близької до номінального, зневажають струмом х.х. і вважають, що $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$. Отримана в цьому випадку помилка цілком припустима, тому що струм I_0 у порівнянні зі струмами I_1 й I_2 невеликий. При зробленому допущенні схема заміщення трансформатора здобуває спрощений вид, тому що не має галузі намагнічування й складається тільки з послідовних ділянок $r_k = r_1 + r'_2$ і $x_k = x_1 + x'_2$ (мал. 1.35, а).

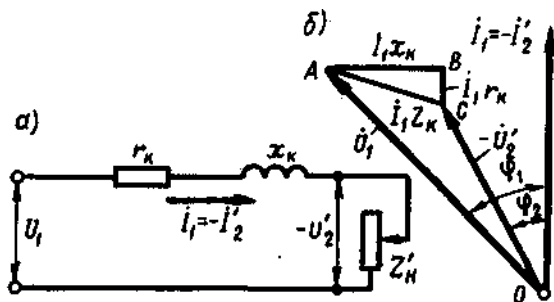


Рис. 1.35. Спрощені схеми заміщення (а) і векторна діаграма (б) трансформатора

Відповідно до спрощеної схеми заміщення побудована й упрощена векторна діаграма (мал. 1.35, б), у якій прямокутний трикутник ABC являє собою трикутник к. з., сторони якого відповідно рівні:

$$BC = I_1 r_k; \quad CA = I_1 Z_k; \quad AB = I_1 x_k.$$

Спрощену векторну діаграму трансформатора будують за заданим значенням напруги $U_{1\text{ном}}$, струму $I_{1\text{ном}}$, коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{2\text{ном}}$ і параметрам трикутника к. з. U_k , U_{kA} й $U_{кр}$.

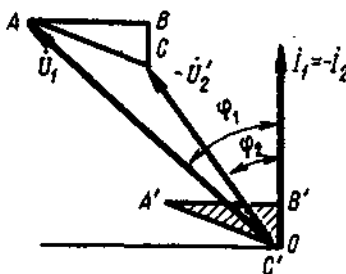


Рис. 1.36. Побудова спрощеної векторної діаграми

Порядок побудови спрощеної векторної діаграми наступний (мал. 1.36). На осі ординат будують вектор струму $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$, потім під кутом φ_2 будують вектор напруги $-\dot{U}'_2$. Трикутник к. з. $A'B'C'$ будують таким чином, щоб крапка C' сполучилася із крапкою початку координат, а катет $C'B'$ — з віссю ординат. Потім цей трикутник переносять, сполучаючи крапку C з кінцем вектора $-\dot{U}'_2$, а сторони залишаючи паралельними вихідному трикутнику $A'B'C'$. Одержують трикутник ABC . Після цих побудов з початку осей координат (крапка $ППО$) проводять вектор первинного (фазного) напруги \dot{U}_1 й визначають кут фазового зрушення φ_1 між первинним струмом \dot{I}_1 , і первинною напругою \dot{U}_1 .

2 Зовнішня характеристика трансформатора

При коливаннях навантаження трансформатора його вторинна напруга U'_2 міняється. У цьому можна переконається, скориставшись спрощеною схемою заміщення трансформатора (див. мал. 1.35.), з якої треба, що $\dot{U}'_2 = \dot{U}_{1\text{ном}} - \dot{I}_1 Z_k$.

Рис. 1.38. Залежність ΔU від величини навантаження (а) і коефіцієнта потужності навантаження (б) трифазного трансформатора (100 кв·А, 6,3/0,22 квт, $u_r=5,4\%$, $\cos\varphi_r=0,4$)

На мал. 1.38, а представлений графік залежності $\Delta U = f(\varphi_2)$ при $\cos\varphi_2=\text{const}$, а на мал. 1.38, б – графік $\Delta U = f(\cos\varphi_2)$ при $\beta=\text{const}$. На цих графіках негативні значення ΔU при роботі трансформатора з ємнісним навантаженням відповідають підвищенню напруги при переході від режиму х.х. до навантаження. Маючи на увазі, що $u_{k.a.} = u_k \cos\varphi_k$, $u_{k.p.} \sin\varphi_k$, одержимо ще одне вираження для розрахунку зміни вторинної напруги при будь-якому навантаженні:

$$\Delta U = \beta u_k (\cos\varphi_k \cos\varphi_2 + \sin\varphi_k \sin\varphi_2) = \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (1.72)$$

З (1.72) треба, що найбільше значення зміни напруги $\Delta U = u_k$ має місце при рівності кутів фазового зрушення $\varphi_2=\varphi_{до}$, тоді $\cos(\varphi_k-\varphi_2)=1$.

Залежність вторинної напруги U_2 трансформатора від навантаження I_2 називають *зовнішньою характеристикою*. Нагадаємо, що в силових трансформаторах за номінальну напругу на затисках вторинної обмотки в режимі х.х. при номінальній первинній напрузі (див. § 1.3.).

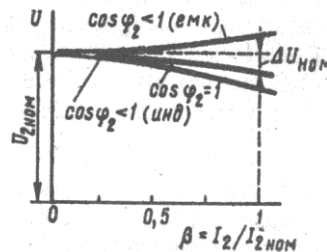


Рис. 1.39. Зовнішні характеристики трансформатора.

Вид зовнішньої характеристики (мал. 1.39) залежить від характеру навантаження трансформатора ($\cos\varphi_2$). Зовнішню характеристику трансформатора можна побудувати по (1.72) шляхом розрахунку ΔU для різних значень β і $\cos\varphi_2$.

Самостійна робота №5

Тема: Групи з'єднання обмоток. Паралельна робота ТР.

Мета: вивчити групи з'єднання обмоток та умови паралельної роботи ТР.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Групи з'єднання обмоток
- 2 Паралельна робота трансформаторів

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Які є групи з'єднання обмоток однофазних ТР?
- 2 Скільки є груп з'єднання обмоток ТР?
- 3 Якими методами можна перевірити групи з'єднання обмоток ТР?
- 4 Поясніть методи перевірки групи з'єднання обмоток ТР.
- 5 Навіщо ТР вмикають на паралельну роботу?
- 6 Назвіть умови паралельної роботи ТР.

1 Групи з'єднання обмоток

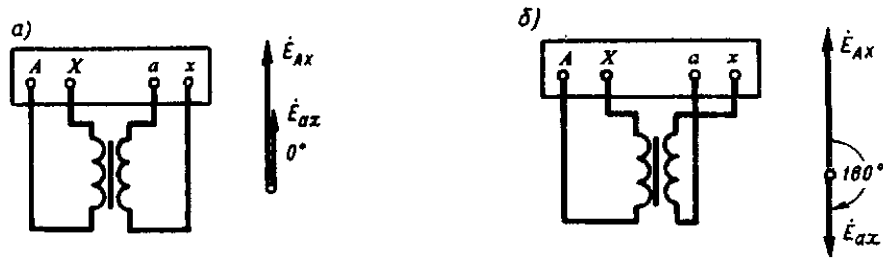


Рис. 2.1. Групи з'єднання обмоток однофазних трансформаторів:
а — група I/— 0; б — група I/— 6

Дотепер при побудові векторних діаграм трансформатора вважалося, що ЕРС фази обмотки ВН \dot{E}_{AX} й обмотки НН \dot{E}_{ax} збігаються по фазі. Але це справедливо лише за умови намотування первинної й вторинної обмоток трансформатора в одному напрямку й однойменному маркуванні виводів цих обмоток, як показано на мал. 2.1, а. Якщо ж у трансформаторі змінити напрямок обмотки НН або ж переставити позначення її виводів, то ЕРС \dot{E}_{ax} виявиться зрушеної по фазі відносно ЕРС \dot{E}_{AX} на 180° (мал. 2.1, б). Зрушення фаз між ЕРС \dot{E}_{AX} і \dot{E}_{ax} прийнято виражати групою з'єднання. Тому що це зрушення фаз може змінюватися від 0 до 360° , а кратність зрушення становить 30° , то для позначення групи з'єднання прийнятий ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 й 0.

Кут зсуву вектора лінійної ЕРС обмотки НН стосовно вектора лінійної ЕРС обмотки ВН визначають множенням числа, що позначає групу з'єднання, на 30° . Кут зсуву відраховують від вектора ЕРС обмотки ВН по годинній стрілці до вектора ЕРС обмотки НН. Наприклад, група з'єднання 5 указує, що вектор ЕРС НН відстає по фазі від вектора ЕРС ВН на кут $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$.

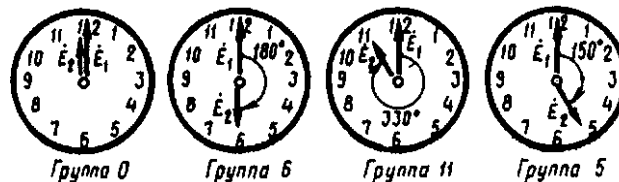


Рис. 2.2. Порівняння положення стрілок годин з позначенням груп з'єднання

Для кращого розуміння прийнятого позначення груп з'єднання користуються порівнянням з годинниками. При цьому вектор ЕРС обмотки ВН відповідає хвилиничній стрілці, установленій на цифрі 12, а вектор ЕРС обмотки НН — годинничній стрілці (мал. 2.2). Так само необхідно мати у виді, що збіг по фазі векторів ЕРС \dot{E}_{AX} й \dot{E}_{ax} , еквівалентне збігу стрілок годин на циферблаті, позначається групою 0 (а не 12). Крім того, варто пам'ятати, що за позитивний напрямок обертання векторів ЕРС прийняте їхнє обертання проти вартовий стрілки.

Таким чином, в однофазному трансформаторі можливі лише дві групи з'єднання: група 0, що відповідає збігу по фазі \dot{E}_{AX} й \dot{E}_{ax} , і група 6, що відповідає зрушенню фаз між \dot{E}_{AX} і \dot{E}_{ax} на 180° . Із цих груп ДЕРЖСТАНДАРТ передбачає лише групу 0, вона позначається I/—0.

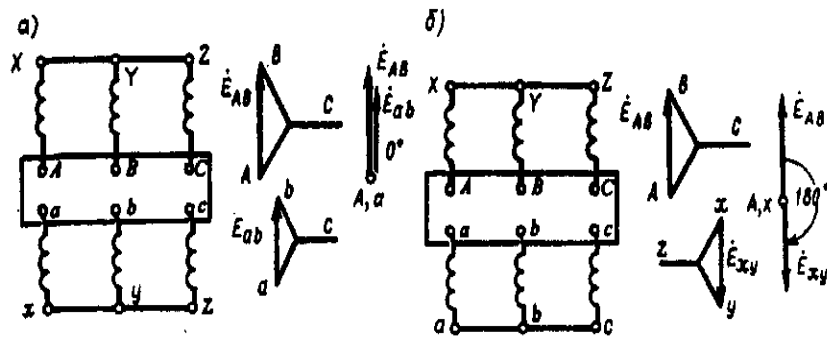


Рис. 2.3. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: а — для группы $\Delta/\Delta-0$; б — для группы

Застосуванням різних способів з'єднання обмоток у трифазних трансформаторах можна створити 12 різних груп з'єднання. Розглянемо як приклад схему з'єднань «зірка-зірка» (мал. 2.3, а). Векторні діаграми ЕРС показують, що зрушення між лінійними ЕРС \dot{E}_{AB} й \dot{E}_{ab} у цьому випадку дорівнює нулю. У цьому можна переконатися, сполучивши крапки А і а при накладенні векторних діаграм ЕРС обмоток ВН і НН. Отже, при зазначених схемах з'єднання обмоток має місце група 0; позначається $Y/Y-0$. Якщо ж на стороні НН у нульову крапку з'єднати затискачі а, б і з, а знімати ЕРС із затискачів x, y і z, то ЕРС \dot{E}_{ab} змінить фазу на 180° і трансформатор буде належати групі 6 ($Y/Y-6$) (мал. 2.3, б).

При з'єднанні обмоток «зірка-трикутник», показаному на мал. 2.4, а, має місце група 11 ($Y/\Delta-11$). Якщо ж поміняти місцями початки й кінці фазних обмоток НН, то вектор \dot{E}_{ab} повернеться на 180° і трансформатор буде ставитися до групи 5 ($Y/\Delta-5$) (мал. 2.4, б).

При однакових схемах з'єднання обмоток ВН і НН, наприклад Y/Y й Y/Δ , одержують парні групи з'єднання, а при 62 неоднакових схемах, наприклад Y/Δ або Δ/Y , - непарні.

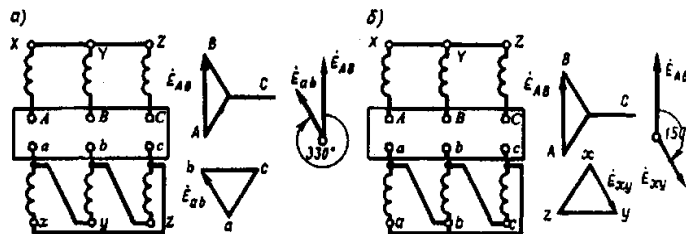


Рис. 2.4. Схемы з'єднання обмоток і векторні діаграми: а — для групи $Y/\Delta-11$; б — для групи $Y/\Delta-5$

Розглянуті чотири групи з'єднання (0, 6, 11 й 5) називають *основними*. З кожної основної групи з'єднання методом кругового перемаркування виводів на одній стороні трансформатора, наприклад на стороні НН (без зміни схеми з'єднання), можна одержати по двох похідні групи. Наприклад, якщо в трансформаторі із групою з'єднання $Y/Y-0$ (мал. 2.3, а) виводи обмотки НН перемаркірувати й замість послідовності abc прийняти послідовність cab, то вектор ЕДС \dot{E}_{ab} повернеться на 120° , при цьому одержимо групу з'єднання $Y/Y-4$. Якщо ж виводи обмоток НН перемаркірувати в послідовність bca, то вектор \dot{E}_{ab} повернеться ще на 120° , а всього на 240° ; одержимо групу $Y/Y-8$.

Аналогічно від основної групи 6 шляхом кругового перемаркування одержують похідні групи 10 й 2, від основної групи 11 - похідні групи 3 й 7, від основної групи 5 - похідні групи 9 й 1.

Основні групи з'єднання мають деяка перевага перед похідними, тому що передбачають однойменне маркування виводів обмоток, розташованих на одному стрижні. Це зменшує ймовірність помилкових приєднань. Однак не всі групи з'єднання мають практичне застосування в трифазних трансформаторах. ДЕРЖСТАНДАРТ визначає схеми й групи з'єднання, застосовувані для силових двухобмоточних трансформаторів загальпромислового призначення (мал. 2.5).

Схеми з'єднання обмоток		Діаграми векторів ЕДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				$\frac{Y}{\Delta} - 0$
				$\frac{Y}{\Delta} - 11$
				$\frac{Y}{\Delta} - 11$
				$\frac{Y}{\Delta} - 11$
				$\frac{\Delta}{Y} - 11$

Рис. 2.5. Схеми й групи з'єднання обмоток трифазних двухобмоткових трансформаторів

З'єднуючи обмотки НН у зигзаг у сполученні із з'єднанням обмотки ВН у зірку або трикутник, можна одержати практично будь-який кут зрушення фаз між ЕРС обмоток ВН і НН. Цього досягають поділом обмотки НН на дві частини з різним співвідношенням витків у цих частинах, а отже, і з різним значенням кута β (см. мал. 1.22, б).

При виготовленні або в процесі експлуатації трансформаторів іноді виникає необхідність у досвідченій перевірці групи з'єднання. Існує кілька методів такої перевірки, але найпоширеніші методи фазометра й вольтметра.

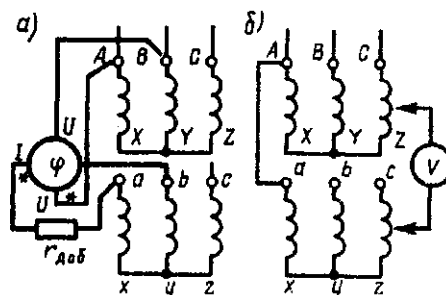


Рис. 2.6. Перевірка групи з'єднання $Y/Y-0$ методами фазометра (а) і вольтметра (б)

Метод фазометра. Заснований на безпосередньому вимірі кута фазового зрушення між відповідними лінійними напругами (ЕРС) обмоток ВН і НН за допомогою фазометра ϕ , включеного за схемою, показаної на мал. 2.6, а. Паралельну обмотку фазометра $U-U$ підключають до сторони ВН, а послідовну обмотку $I-I$ — до сторони НН. Для обмеження струму в послідовній обмотці її підключають через додатковий опір $r_{доб}$. Потім трансформатор включають у мережу із симетричною трифазною напругою. Для зручності вимірів бажано, щоб фазометр мав повну (360°) шкалу.

Метод вольтметра. Безпосереднього виміру кута фазового зрушення між лінійними напругами (ЕРС) цей метод не дає. Це *непрямий* метод і заснований на вимірі вольтметром напруг (ЕРС) між однойменними виводами обмоток ВН і НН. Якщо перевіряють групу з'єднання *Y/Y-ПРО* (мал. 2.6, б), те, з'єднавши проведенням виводи *A* і *a*, вимірюють напругу *З* (між виводами *b* й *B*) і *U_{c-3}* (між виводами *з* і *З*). Якщо передбачувана група з'єднання *Y/Y-0* відповідає фактичній, то напруга (*B*)

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}(k_n - 1), \quad (2.1)$$

де $k_n = U_{AB}/U_{ab}$ — відношення лінійних напруг (ЕРС) ВН і НН, т. е. коефіцієнт трансформації лінійних напруг (ЕРС),

Якщо перевіряють групи з'єднання 6, 11 або 5, то для перевірки обмірюваних значень напруг користуються формулами:

група *Y/Y-6*

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{xy}(k_n + 1); \quad (2.2)$$

група *Y/(-11)*

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}(1 - \sqrt{3}k_n + k_n^2); \quad (2.3)$$

група *Y/(-5)*

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}(1 + \sqrt{3}k_n + k_n^2); \quad (2.4)$$

Тут U_{ab} й U_{xy} — лінійні напруги на виводах обмоток НН, В.

Якщо умови рівності напруг по приводять формулам, що, не дотримуються, то це свідчить про порушення в маркуванні виводів трансформатора.

2 Паралельна робота трансформаторів

Паралельною роботою двох або декількох трансформаторів називається робота при паралельному з'єднанні їхніх обмоток як на первинній, так і на вторинній сторонах. При паралельному з'єднанні однойменні затискачі трансформаторів приєднують до тому самому проведенню мережі (мал. 2.7, а).

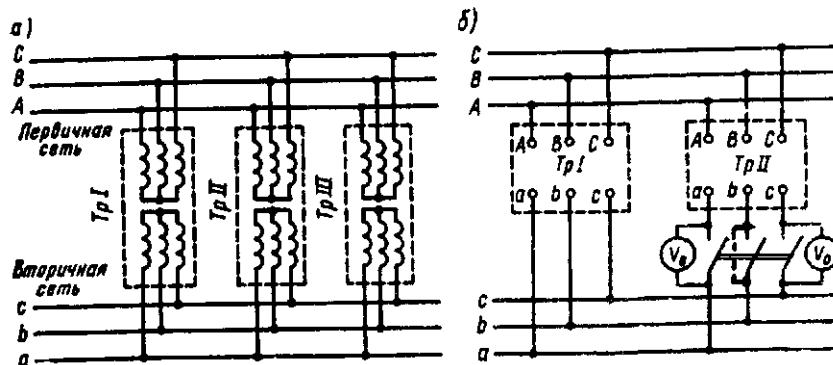


Рис. 2.7. Включення трансформаторів на паралельну роботу

Застосування декількох паралельно включених трансформаторів замість одного трансформатора сумарної потужності необхідно для забезпечення безперебійного енергопостачання у випадку аварії в якому-небудь трансформаторі або відключення його для ремонту. Це також доцільно при роботі трансформаторної підстанції зі змінним графіком навантаження, наприклад коли потужність навантаження значно міняється в різні годинники доби. У цьому випадку при зменшенні потужності навантаження можна відключити один або кілька трансформаторів для того, щоб навантаження трансформаторів, що залишилися включеними, була близька до номінального. У підсумку експлуатаційні показники роботи трансформаторів (КПД і $\cos\phi_2$) будуть досить високими.

Для того щоб навантаження між паралельно працюючими трансформаторами розподілялася пропорційно їхнім номінальним потужностям, допускається паралельна робота двухобмоточних трансформаторів при наступних умовах:

1. При однаковій первинній напрузі вторинні напруги повинні бути рівні. Інакше кажучи, трансформатори повинні мати однакові коефіцієнти трансформації: $k = k_{II} = k_{III} = \dots$. При недотриманні цієї умови, навіть у режимі х.х., між паралельно включеними трансформаторами виникає зрівняльний струм, обумовлений різницею вторинних напруг трансформаторів ΔU (мал. 2.8, а):

$$\dot{I}_{зр} = \Delta \dot{U} / (Z_{kI} + Z_{kII}), \quad (2.5)$$

де Z_k й Z_{kII} — внутрішні опори трансформаторів.

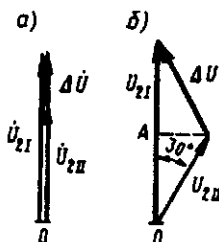


Рис. 2.8. Поява напруги ΔU при недотриманні умов включення трансформаторів на паралельну роботу

При навантаженні трансформаторів зрівняльний струм накладається на навантажувальний. При цьому трансформатор з більшою високою вторинною напругою х.х. (з меншим коефіцієнтом трансформації) виявляється перевантаженим, а трансформатор рівної потужності, але з більшим коефіцієнтом трансформації - недовантаженим. Тому що перевантаження трансформаторів неприпустиме, то доводиться знижувати загальне навантаження. При значній різниці коефіцієнтів трансформації нормальна робота трансформаторів стає практично неможливою. Однак ДЕРЖСТАНДАРТ допускає включення на паралельну роботу трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації, якщо різниця коефіцієнтів трансформації не перевищує $\pm 0,5\%$ їхнього середнього значення:

$$\Delta k = [(k_I - k_{II}) / k] 100\% \leq 0,5\% \quad (2.6)$$

де $k = \sqrt{k_I k_{II}}$ — середнє геометричне значення коефіцієнтів трансформації.

2. Трансформатори повинні належати до однієї групи з'єднання. При недотриманні цієї умови вторинні лінійні напруги трансформаторів виявляються зрушеними по фазі відносно один одного й у ланцюзі трансформаторів з'явиться різницева напруга ΔU , під дією якого виникне значний зрівняльний струм. Так, якщо включити на паралельну роботу два трансформатори з однаковими коефіцієнтами трансформації, але один з них належить до нульового (Y/Y—0), а іншої — до одинадцятого (Y/A—11) груп з'єднання, то лінійна напруга U_{2I} перші трансформатори, буде більше лінійної напруги U_{2II} другі трансформатори в $\sqrt{3}$ раз ($U_{2I} / U_{2II} = \sqrt{3}$). Крім того, вектори цих напруг виявляться зрушеними по фазі відносно один одного на кут 30° (мал. 28, б). У цих умовах у вторинному ланцюзі трансформаторів з'явиться різницева напруга ΔU . Для визначення величини ΔU скористаємося побудовами мал. 28, б: відрізок OA дорівнює $\sqrt{3} U_{2II} / 2$ або, з огляду на, що $U_{2II} = U_{2I} / \sqrt{3}$, одержимо $OA = 0,5 U_{2I}$. Отже, трикутник, утворений векторами напруг U_{2I} , U_{2II} й ΔU — рівнобедрений, а тому різницева напруга $\Delta U = U_{2II}$. Поява такої різницевої напруги привело б до виникнення у вторинному ланцюзі трансформаторів зрівняльного струму, в 15—20 разів перевищуючий номінальний струм навантаження, т. е, виникла б аварійна ситуація. Величина ΔU стає ще більшою, якщо трансформатори належать нульовій і шостій групам з'єднання ($\Delta U = 2U_2$), тому що в цьому випадку вектори лінійних вторинних напруг виявляються в протифазі (див. мал. 2.3, б).

3. Трансформатори повинні мати однакові напруги к. з.: $u_{kI} = u_{kII} = u_{kIII} = \dots$. Дотримання цієї умови необхідно для того, щоб загальне навантаження розподілялося між трансформаторами пропорційно їхнім номінальним потужностям.

З деяким наближенням, зневажаючи струмами х.х., можна паралельно включені трансформатори замінити їхніми опорами к. з. z_{kI} й z_{kII} і тоді від схеми, показаної на мал. 2.9, а, можна перейти до еквівалентної схеми (мал. 2.9, б). Відомо, що струми в паралельних галузях розподіляються назад пропорційно їхні опорим:

$$I_I / I_{II} = Z_{kII} / Z_{kI} \quad (2.7)$$

Помножимо обидві частини рівності (2.7) на $I_{IНОМ} U_{НОМ} / (I_{IIНОМ} U_{НОМ})$, ліву частину — на $U_{НОМ} / U_{НОМ}$, а праву частину — на $100/100$, одержимо

$$\frac{I_I I_{IНОМ} U_{НОМ} U_{НОМ}}{I_{II} I_{IIНОМ} U_{НОМ} U_{НОМ}} = \frac{Z_{kII} I_{IНОМ} U_{НОМ} 100}{Z_{kI} I_{IIНОМ} U_{НОМ} 100}$$

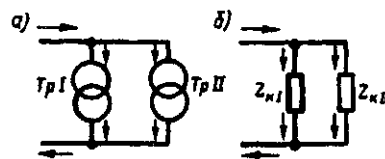
Потім перетворимо отриману рівність, маючи на увазі наступне: $I_I U_{НОМ} = S_I$, і $I_{II} U_{НОМ} = S_{II}$ — фактичне навантаження першого й другого трансформаторів відповідно, В-А; $I_{IНОМ} U_{НОМ} = S_{IНОМ}$ й $I_{IIНОМ} U_{НОМ} = S_{IIНОМ}$ номінальні потужності цих трансформаторів, В-А; $(I_{IНОМ} Z_{kI} / U_{НОМ}) 100 = u_{Ik}$ й $(I_{IIНОМ} Z_{kII} / U_{НОМ}) 100 = u_{IIk}$ — напруги к. з. трансформаторів, %. У результаті одержимо

$$(S_I / S_{IНОМ}) (S_{II} / S_{IIНОМ}) \quad (2.8)$$

або

$$S'_I / S'_{II} = u_{kII} / u_{kI} \quad (2.9)$$

де $S'_I = S_I / S_{IНОМ}$, $S'_{II} = S_{II} / S_{IIНОМ}$ — відповідно відносні потужності (навантаження) першого й другого трансформаторів.



мал. 2.9. До поняття про розподіл навантаження при паралельній роботі трансформаторів.

Зі співвідношення (2.9) треба, що відносні *потужності (навантаження) паралельно працюючих трансформаторів обернено пропорційні їхнім напругам к. з.* Інакше кажучи, при нерівності напруг к. з. паралельно працюючих трансформаторів більше навантажується трансформатор з меншою напругою к. з. У підсумку це веде до перевантаження одного трансформатора (з меншим u_k) і недовантаженню іншого (з більшим u_k). Щоб не допустити перевантаження трансформатора, необхідно знизити загальне навантаження. Таким чином, нерівність напруг к.з. не допускає повного використання по потужності паралельно працюючих трансформаторів.

З огляду на, що практично не завжди можна підібрати трансформатори з однаковими напругами к.з., ДЕРЖСТАНДАРТ допускає включення трансформаторів на паралельну роботу при різниці напруг к.з. не більш ніж 10% від їх середнього арифметичного значення. Різниця в напругах к.з. трансформаторів тим більше, чим більше ці трансформатори відрізняються друг від друга по потужності. Тому ДЕРЖСТАНДАРТ рекомендує, щоб відношення номінальних потужностей трансформаторів, включених паралельно, було не більш ніж 3:1.

Крім дотримання зазначених трьох умов необхідно перед включенням трансформаторів на паралельну роботу перевірити порядок чергування фаз, що повинен бути однаковим у всіх трансформаторів.

Дотримання всіх перерахованих умов перевіряється *фазировкой трансформаторів*, сутність якої полягає в тому, що одну пару, протилежно розташованих затискачів на рубильнику (див. мал. 2.7, б),

з'єднують проведенням і вольтметром V_0 (нульовий вольтметр) вимірюють напругу між несполученими парами, що залишилися, затискачів рубильника. Якщо вторинні напруги трансформаторів рівні, їхньої групи з'єднання однаковий і порядок проходження фаз у них той самий, то показання вольтметра V_0 дорівнюють нулю. У цьому випадку трансформатори можна підключати на паралельну роботу. Якщо вольтметр V_0 покаже деяку напругу, то необхідно з'ясувати, яке з умов паралельної роботи порушено. Необхідно усунути це порушення й знову провести фазировку трансформаторів. Слід зазначити, що при порушенні порядку проходження фаз вольтметр V_0 покаже подвійна лінійна напруга. Це необхідно враховувати при підборі вольтметра, межа виміру якого повинен бути не менш подвійної лінійної напруги на вторинній стороні трансформаторів.

Общая навантаження всіх включених на паралельну роботу трансформаторів S не повинна перевищувати сумарний номінальної потужності цих трансформаторів: $S \leq \sum SHOM$.

Розподіл навантаження між паралельно працюючими трансформаторами визначається в такий спосіб:

$$S_x = S S_{ном.x} / [u_{кx} \sum (S_{ном.x} / u_{кx})] \quad (2.10)$$

де S_x — навантаження одного з паралельно працюючих трансформаторів, кВА; S — загальне навантаження всієї паралельної групи, кВА; $S_{ном.x}$ — номінальна потужність даного трансформатора, кВА. У вираженні (2.10)

$$\sum (S_{ном.x} / u_{кx}) = (S_{номI} / u_{кI}) + (S_{номII} / u_{кII}) + \dots \quad (2.11)$$

Приклад 2.1. Три трифазних трансформатори з однаковими групами з'єднання включені паралельно (див. мал. 2.7, а) на загальне навантаження 5000 кВА. Трансформатори мають наступні дані $S_{номI} = 1000$ кВА, $u_{кI} = 6,5\%$, $S_{номII} = 1800$ кВА, $u_{кII} = 6,65\%$, $S_{номIII} = 2200$ кВА, $u_{кIII} = 6,3\%$. Визначити навантаження кожного трансформатора

Решение. По (2.11) визначимо

$$\sum (S_{ном.x} / u_{кx}) = 1000 / 6,5 + 1800 / 6,65 + 2200 / 6,3 = 775.$$

По (2.10) визначимо навантаження кожного трансформатора:

$$S_I = 5000 \cdot 1000 / (6,5 \cdot 775) = 995 \text{ кВА};$$

$$S_{II} = 5000 \cdot 1800 / (6,65 \cdot 775) = 1755 \text{ кВА};$$

$$S_{III} = 5000 \cdot 2200 / (6,3 \cdot 775) = 2250 \text{ кВА},$$

т. е. третій трансформатор виявився перевантаженим на $[(2250 - 2200) / 2200] \cdot 100 = 2,3\%$.

Для усунення цього перевантаження варто знизити зовнішнє навантаження трансформаторів на 2,3%, тобто зменшити її до $S' = S - 2,3S / 100 = 5000 - 2,3 \cdot 5000 / 100 = 4885$ кВА.

В цьому випадку сумарна потужність трансформаторів буде використана лише на 97,7%.

Самостійна робота №6

Тема: ТР для випрямлюючих та автоматичних пристроїв.

Мета: ознайомитися з принципом дії ТР та їх видами для випрямлюючих та автоматичних установок.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Трансформатори для випрямних установок
- 2 Трансформатори для автоматичних пристроїв

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Дайте визначення потоку змушеного намагнічування.
- 2 Які є схеми випрямлення?
- 3 Опишіть принцип дії ТР для випрямляючих установок.
- 4 Опишіть принцип дії імпульсних ТР.
- 5 Які магнітопроводи застосовують в імпульсних ТР?
- 6 Опишіть принцип дії пік-трансформаторів.
- 7 Для чого призначені перетворювачі частоти?

1 Трансформатори для випрямних установок

У вторинні обмотки цих трансформаторів включені вентиля - пристрою, що володіють однобічною провідністю.

Розглянемо роботу однофазного трансформатора в схемі *однополуперіодного випрямлення* (мал. 5.3, а). Струм у вторинній обмотці цього трансформатора i_2 є пульсуючою, тому що він створюється тільки позитивними напівхвилями вторинної напруги U_2 (мал. 5.3, б). Цей пульсуючий струм має дві складові: постійну

$$I_d = (\sqrt{2} / \pi)(U_2 / R_n) \quad (5.2)$$

і змінну

$$i_{nep} = i_2 - I_d. \quad (5.3)$$

Зневажаючи струмом х.х. і з огляду на (5.3), рівняння МДС розглянутого трансформатора можна записати у вигляді

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_1 w_1 + i_{nep} w_2 + I_d w_2 = 0. \quad (5.4)$$

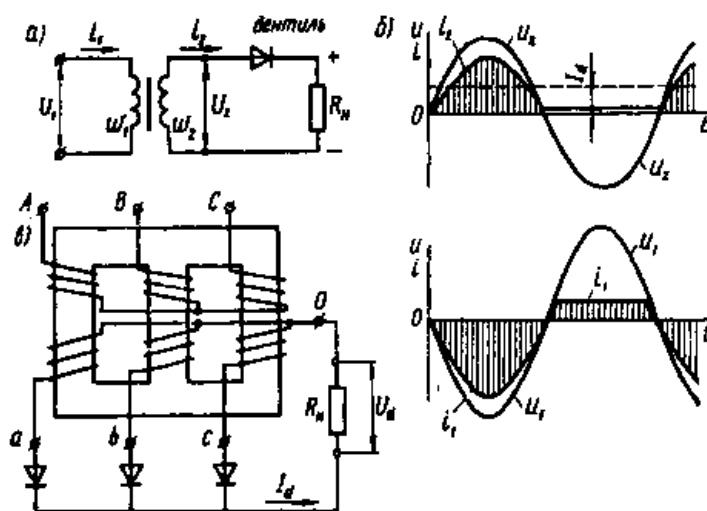


Рис. 5.3. Трансформатор у схемі випрямлення

У первинну обмотку трансформується лише змінна складова вторинного струму (5.3), тому МДС $I_d w_2$ залишається невірноваженою й створює в магнітопроводі трансформатора постійний магнітний потік Φ_d , названий *потокм змушеного намагнічування*. Цей потік викликає додаткове магнітне насичення елементів магнітопровода; для того щоб це насичення не перевищувало припустимого значення, необхідно збільшити перетин сердечників й ярем. Ця міра приводить до збільшення витрати сталі й міді, тобто веде до підвищення габаритів, ваги й вартості трансформатора. Цей недолік однофазної однополуперіодної схеми поширюється й на трифазну однополуперіодну схему при сполуці вторинної обмотки трансформатора за схемою «зірка-зірка з нульовим висновком» (мал. 5.3, в). У цьому випадку магнітний потік змушеного намагнічування Φ_d значно менше, тому що, діючи одночасно у всіх трьох стрижнях магнітопровода, він замикається поза магнітопровода — через мідь, повітря, стінки бака — аналогічно третім гармонікам основного магнітного потоку. Однофазну однополуперіодну схему застосовують лише для малопотужних випрямлячів, що порозумівається не тільки недоліком, викликаним наявністю потоку Φ_d , але й значними пульсаціями випрямленого струму. Трифазна однополуперіодная схема сполуки вторинної обмотки в зірку з нульовим висновком також обмежується випрямлячами невеликої потужності. Якщо ж вторинну обмотку з'єднати в рівноплечий зигзаг з нульовим висновком, то недоліки однополуперіодної схеми випрямлення, обумовлені виникненням потоку Φ_d , усуваються.

Порозумівається це тим, що при сполуці в равноплечий зигзаг на кожному стрижні виявляються дві вторинні котушки із зустрічною сполукою. При трифазній однополуперіодній схемі струм I_d проходячи по всіх фазах вторинної обмотки, створює в кожному стрижні два потоки $\Phi_d/2$, але тому що ці потоки спрямовані в різні сторони, то вони взаємно врівноважуються. Це достоїнство схеми сполуки обмоток у зигзаг дозволяє застосовувати трифазну однополуперіодну схему при значних потужностях.

В *двухнапівперіодних* схемах, коли струм у вторинному ланцюзі трансформатора створюється протягом обох напівперіодів, умови роботи трансформатора виявляються набагато краще й неврівноваженої МРС не виникає.

Іншою обставиною, що небажано впливає на роботу трансформаторів у схемах випрямлення, є несинусоїдальна форма струмів в обмотках. У результаті в первинній і вторинній обмотках з'являються струми вищих гармонік, що погіршують експлуатаційні показники трансформатора, що зокрема знижують його ККД.

Кількісно вплив різних причин на роботу трансформаторів у схемах випрямлення залежить від ряду факторів: схем випрямлення, наявності фільтра, що згладжує, характеру навантаження.

У зв'язку з тим що первинний і вторинний струми трансформаторів мають різні діючі значення (через їх несинусоїдальності), розрахункові потужності первинної й вторинної обмоток того самого трансформатора неоднакові ($S_{1ном} \neq S_{2ном}$). Тому для оцінки потужності трансформатора, що працює у випрямній схемі, уводяться поняття типової потужності

$$S_T = 0,5(S_{1ном} + S_{2ном}) = 0,5(I_{1ном}U_{1ном} + I_{2ном}U_{2ном}) \quad (5.5)$$

і коефіцієнта типової потужності

$$k_T = S_T / P_{дню}, \quad (5.6)$$

де вихідна потужність, тобто потужність, що надходить у споживач постійного струму,

$$P_{дню} = U_{дню} I_{дню} \quad (5.7)$$

у номінальному режимі (при номінальних напругах $U_{дном}$ і струмі $I_{дном}$).

Типова потужність трансформатора завжди більше його вихідної потужності, тобто $k_T > 1$. Пояснюється це тим, що при будь-якій схемі випрямлення $U_2 > U_d$ й $I_2 > I_d$

Із цього треба, що габарити й вага трансформаторів для випрямлячів завжди більше, ніж у трансформаторів такої ж вихідної потужності, але при синусоїдальних струмах в обмотках. Це порозумівається тим, що в трансформаторах, що працюють у випрямних схемах, корисна потужність визначається постійної складової вторинного струму I_d а нагрівання обмоток — повним вторинним I_2 і первинним I_1 струмами, що містять вищі гармонійні.

При виборі трансформатора для випрямної установки або ж при його проектуванні необхідно знати значення коефіцієнта k_T .

Значення змінної напруги на виході вторинної обмотки трансформатора, необхідного для одержання заданого номінального значення постійної напруги $U_{дном}$, визначається вираженням

$$U_{2ном} = k_U U_{дню}, \quad (5.8)$$

де k_U — коефіцієнт напруги.

Значення коефіцієнтів напруги k_U і типової потужності k_T для деяких найпоширеніших схем випрямлення наведені нижче.

Схеми випрямлення	k	k
Однофазна однонапівперіодна	2,22	3,09
Однофазна двухнапівперіодна бруківка	1,11	1,23
Однофазна двухнапівперіодна з нульовим висновком	1,11	1,48
	0,855	1,345

Порівняння різних схем випрямлення показує, що краще використання трансформатора забезпечується в мостових схемах випрямлення, для яких коефіцієнт k має мінімальні значення.

2 Трансформатори для автоматичних пристроїв

Імпульсні трансформатори. Застосовуються в пристроях імпульсної техніки для зміни амплітуди імпульсів, виключення постійного складової, розмноження імпульсів і т.п. Одне з основних вимог, пропонованих до імпульсних трансформаторів, - мінімальне перекичування форми імпульсів, що трансформують.

Для з'ясування принципової можливості трансформування короткочасних однополярних імпульсів розглянемо ідеальний трансформатор (без втрат і паразитних ємностей), що працює без навантаження. Допустимо, на вхід цього трансформатора надходять однополярні імпульси прямокутної форми тривалістю t_n з періодом T (мал. 5.4, а). Первинний контур трансформатора володіє деякою постійною часу $\tau = L_1/r_1$, обумовленою індуктивністю цього контуру.

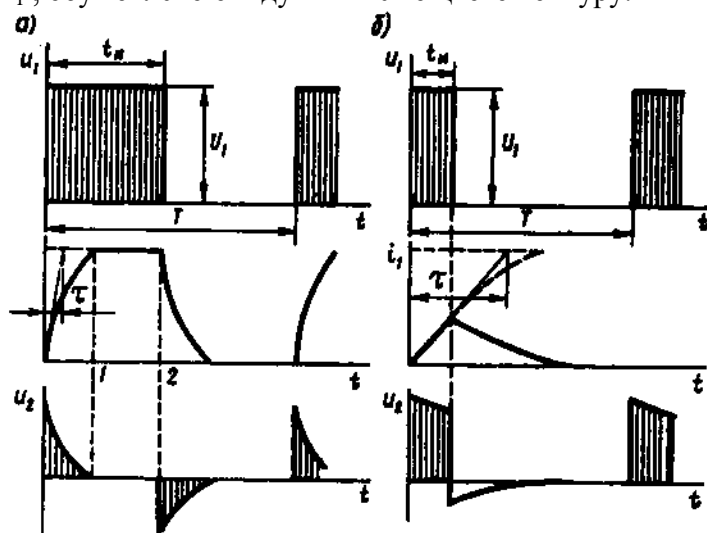


Рис. 5.4. Графіки напруги в імпульсному трансформаторі

Розглянемо випадок, коли постійна часу набагато менше тривалості імпульсу: $\tau \ll t_n$. При цьому графік первинного струму $i_1 = f(t)$ має вигляд кривої, що відрізняється від прямокутника. Крива ж вторинної напруги $u_2 = f(t)$ значно перекичена. При цьому в інтервалі часу 1—2 напруга $U_2 = \text{ПРО}$, тому що при $t_1 = \text{const}$ ЕДС $e_2 = M(di/dt) = 0$, де M — взаємна індуктивність між обмотками. Отже, при $\tau \ll t_n$ трансформування імпульсів неможливо.

Розглянемо інший випадок, коли $\tau \ll t_n$. Цей випадок більше реальний, тому що тривалість імпульсів звичайно не перевищує 10^{-4} с. Тепер, коли імпульс u_1 припиняється ще до закінчення перехідного процесу в первинному ланцюзі, імпульси на виході трансформатора u_2 не мають значних перекичувань (мал. 5.4, б). При цьому негативна частина імпульсу легко усувається включенням діода у вторинний ланцюг трансформатора.

Розглянуті явища виявляють лише принципову можливість трансформування короткочасних однополярних імпульсів без особливих перекичувань їхньої форми. При більш докладному розгляді роботи імпульсного трансформатора електромагнітні процеси в ньому виявляються набагато складніше, тому що на них значний вплив роблять явище гістерезису, вихрові струми, паразитні ємнісні зв'язки (між витками й обмотками) і індуктивності розсіювання обмоток. Для ослаблення небажаного впливу перерахованих факторів імпульсні трансформатори

проектують таким чином, щоб вони працювали з лінійною магнітною характеристикою, тобто з таким значенням магнітної індукції в сердечнику, при якому робоча крапка розташована нижче зони магнітного насичення на кривій намагнічування трансформатора. Крім того, магнітний матеріал сердечника повинен мати невелику залишкову індукцію (малою коерцитивною силою). Для зниження залишкової індуктивності магнітопровод імпульсного трансформатора в деяких випадках постачають невеликим повітряним зазором. Із цією ж метою іноді застосовують підмагнічування трансформатора постійним струмом, полярність якого протилежна полярності імпульсів, що трансформують. Цей захід дозволяє знизити магнітну індукцію в сердечнику в інтервалі між імпульсами.

Магнітопроводи імпульсних трансформаторів виготовляють із магнітних матеріалів з підвищеною магнітною проникністю (холоднокатана сталь, железоникелевые сплави й ін.) при товщині стрічки 0,02-0,35 мм. Іноді магнітопровод роблять із феррита.

Щоб зменшити паразитні ємності й індуктивності розсіювання обмоток, їх намагаються робити з невеликим числом витків. При цьому мала тривалість імпульсів дозволяє виконувати обмотки імпульсних трансформаторів проведенням зменшеного перетину (застосовувати підвищені щільності струму), не викликаючи неприпустимих перегрівів. Останнє сприяє зменшенню габаритів імпульсних трансформаторів.

Пік-трансформатори. Призначені для перетворення напруги синусоїдальної форми в імпульси напруги шпильстої форми. Такі імпульси напруги необхідні в ланцюгах керування тиристорів, тиратронів й ін. Принцип роботи пік-трансформатора заснований на явищі магнітного насичення феромагнітного матеріалу.

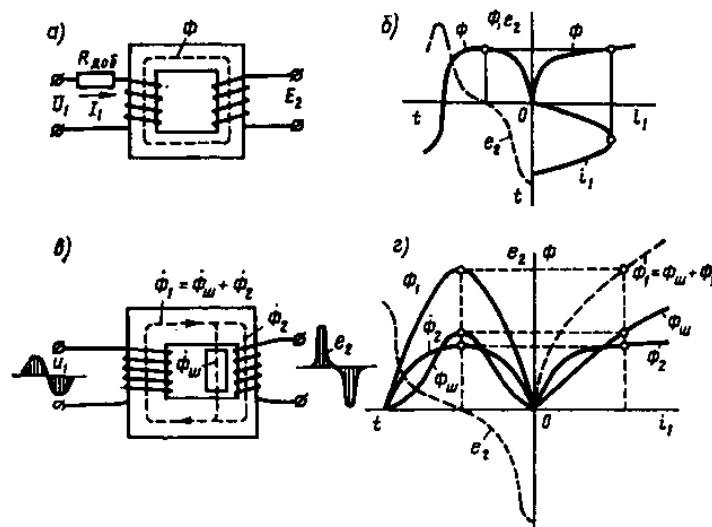


Рис. 5.5. Пік-трансформатори з активним опором (а, б) і магнітним шунтом (в, з)

Пік-трансформатор з активним опором. Первинну обмотку трансформатора підключають до мережі синусоїдальної напруги U_1 через великий активний додатковий опір $R_{доб}$ (рис, 5.5, а). Магнітну індукцію вибирають такою, щоб магнітопровод перебував у стані сильного магнітного насичення. Однак струм, що намагнічує, i_1 при цьому буде мати синусоїдальну форму, тому що його значення визначається опором $R_{доб}$. Магнітний потік Φ у магнітопроводі змінюється але сплюсненій кривій (мал. 5.5, б), а вторинна ЕРС

$$e_2 = -w_2 \Phi / dt \quad (5.9)$$

має шпильсту форму (штрихова крива), досягаючи максимальних (пікових) значень у моменти часу, коли магнітний потік Φ и струм i_1 проходять нульові значення, тобто коли швидкості їхньої зміни максимальні.

Пик-трансформатори з магнітним шунтом. Вторинна обмотка (мал. 5.5, в) розташована на стрижні зменшеного перетину, що перебуває в стані сильного магнітного насичення (крива потоку Φ_2 має сплющену форму). Інші ділянки машопровода магнітно не насичені, а тому крива потоку $\Phi_1 = \Phi_{ш} + \Phi_2$ має синусоїдальну форму (мал. 5.5, з). Сплющена форма кривий $\Phi_2 = f(t)$ забезпечує одержання шпилястої форми вторинної ЕДС — штрихова крива [див. (5.9)].

Магнітопроводи пік-трансформаторів виготовляють звичайно з железоникелевого сплаву (пермаллю).

Перетворювачі частоти. Поширення одержали трансформатори, за допомогою яких можливе подвоєння або потроєння частоти змінного струму.

Розглянемо роботу трансформатора, що збільшує частоту змінного струму в три рази. Він складається із трьох однофазних трансформаторів, що працюють при сильно насиченому магнітопроводі. Первинні обмотки трансформаторів з'єднані зіркою, а вторинні - послідовно (мал. 5.6).

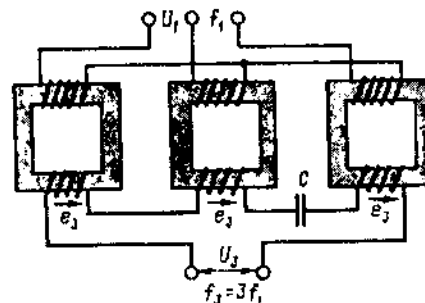


Рис. 5.6. Потріювач частоти

Намагнічуючий струм трансформатора крім основної містить третю гармоніку із частотою $f_3 = 3f_1$. При сполуці обмоток зіркою струми третьої гармоніки взаємно врівноважуються й тоді в складі магнітного потоку з'являється третя гармоніка Φ_3 . У трохстержевом магнітопроводі потоки цієї гармоніки ослаблені. Але в утроителе частоти магнітопроводи однофазних трансформаторів працюють незалежно, тому потоки Φ_3 у них досягають більших значень і наводять у вторинних обмотках ЕРС третьої гармоніки e_3 . Тому що ЕРС e_3 у всіх фазних обмотках збігаються по фазі те на виході утроителя частоти встановлюється напруга U_3 , рівне алгебраїчній сумі ЕРС e_3 частотою $f_3 = 3f_1$. Що ж стосується ЕРС гармоніки, те хоча вона й наводиться у фазних обмотках утроителя, але в складі напруги на виході утроителя вона відсутній, тому що при зрушенні фаз між ЕРС в 120° їхня алгебраїчна сума дорівнює нулю.

Для зниження спадання напруги у вторинних обмотках при навантаженні послідовно з обмотками включають конденсатор С, ємність якого компенсує індуктивність обмоток.

Збільшення частоти в більше число раз можна здійснити застосуванням декількох трансформаторів для перетворення частоти, включених один за іншим (каскадно). Однак цей спосіб підвищення частоти економічно недоцільний, тому що зв'язано зі значною витратою активних матеріалів.

Самостійна робота №7

Тема: ТР для дугового електрозварювання. Охолодження ТР.

Мета: ознайомитися з принципом дії ТР для дугового електрозварювання та з типами охолодження ТР.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Трансформатори для дугового електрозварювання
- 2 Охолодження трансформаторів

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Які особливості роботи ТР для дугового електрозварювання?
- 2 Опишіть принцип дії ТР для дугового електрозварювання.
- 3 Які є види охолодження ТР?
- 4 Який з видів охолодження ТР кращий? Поясніть чому.

1 Трансформатори для дугового електрозварювання

Трансформатор для дугового електрозварювання, зазвичай називають зварювальним трансформатором, являє собою однофазний двухобмоточний понижуючий трансформатор, що перетворює напругу мережі 220 або 380 В в напругу 60-70 В, необхідну для надійного запалювання й стійкого горіння електричної дуги між металевим електродом і зварювальними деталями.

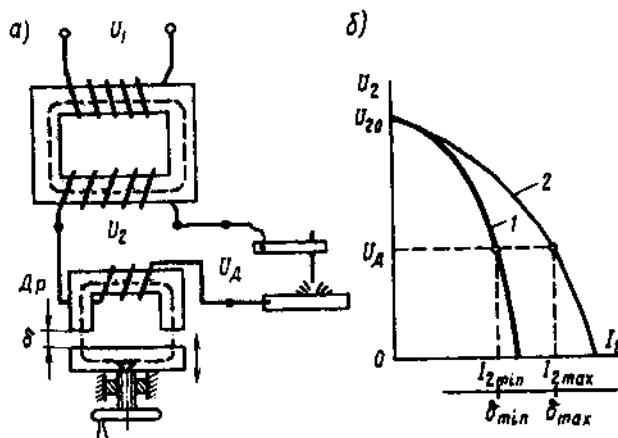


Рис. 5.7. Схема включення (а) і зовнішні характеристики (б) трансформатора для електродугового зварювання

Специфіка роботи зварювального трансформатора складається в переривчастому режимі його роботи: запалюванню електричної дуги передують коротке замикання вторинного кола трансформатора, а обрив дуги створює режим холостого ходу. Номінальний режим роботи трансформатора відповідає стійкому горінню електричної дуги. Для обмеження струму у зварювальному трансформаторі вжиті заходи, суть яких зводиться до збільшення індуктивного опору. Із цією метою первинну обмотку трансформатора розташовують на одному стрижні, а вторинну — на іншому. Це веде до росту магнітного розсіювання, а отже, до збільшення індуктивного опору обмоток. Іншою мірою є включення у вторинний ланцюг трансформатора послідовно індуктивної котушки — дроселя Dp (мал. 5.7, а), що представляє собою котушку з мідного проведення прямокутного перетину, розташовану на сталевому магнітопроводі. Дросель постачений пристроєм типу «гвинт-гайка», що дозволяє обертанням гвинта переміщати ярмо так, що повітряний зазор δ між ярмом і стрижнями міняється від $\delta=0$ до $\delta=\delta_{max}$. При цьому мінімальному значенню δ відповідає найбільший індуктивний опір дроселя, а отже, мінімальне значення робочого струму $I_2 = I_{2min}$, а максимальному значенню $\delta = \delta_{max}$ — найменший індуктивний опір дроселя й максимальне значення робочого струму $I_2 = I_{2max}$. Підвищений індуктивний опір обмоток і наявність дроселя Dp забезпечують зварювальному трансформатору круто падаючі зовнішні характеристики $U_2 = f(I_2)$, необхідні для стійкого горіння електричної дуги (мал. 5.7, б). Змінюючи величину повітряного зазору δ у дроселі Dp можна плавно міняти кут нахилу зовнішніх характеристик: при $\delta \approx 0$ нахил характеристики найбільший (графік 1), а при $\delta = \delta_{max}$ нахил характеристики мінімальний (графік 2). Робочий струм зварювального трансформатора I_2 відповідає напрузі електричної дуги $U_d \approx 30$ В.

У деяких конструкціях зварювальних трансформаторів дросель сполучають із трансформатором. Значний індуктивний опір зварювального трансформатора веде до зниження його коефіцієнта потужності $\cos(\phi)$, що звичайно не перевищує 0,4-0,5.

2 Охолодження трансформаторів

Відсутність у трансформаторів обертових частин зменшує нагрівання трансформатора через відсутність механічних втрат, але ця ж обставина ускладнює процес охолодження, тому що виключає застосування в трансформаторах самовентиляції. Із цієї причини основний спосіб охолодження

трансформаторів - природне охолодження. Однак у трансформаторах значної потужності з метою підвищення питомих електромагнітних навантажень застосовують більше ефективні методи охолодження. Найбільше застосування одержали наступні способи охолодження трансформаторів.

Природне повітряне охолодження. Всі нагрівати частини, що трансформатора безпосередньо стикаються з повітрям. Їхнє охолодження відбувається за рахунок випромінювання теплоти й природної конвекції повітря. Іноді такі трансформатори постачають захисним кожухом, що має жалюзі або ж отвору, закриті сіткою. Цей вид охолодження застосовують у трансформаторах низької напруги при їхній установці в сухих закритих приміщеннях.

Природне масляне охолодження. Магнітопровід з обмотками поміщають у бак, заповнений трансформаторним маслом, що обмиває нагрівають частини, що трансформатора, шляхом конвекції відводить теплоту й передає її стінкам бака, останні, у свою чергу, прохолоджуються шляхом випромінювання теплоти й конвекції повітря. Для збільшення охолоджуваної поверхні бака його роблять ребристим або ж застосовують трубчасті баки (див. мал. 1.13). У трансформаторах великої одиничної потужності труби поєднують у радіатори (радіаторні баки). Нагріті частки масла піднімаються у верхню частину бака й по трубах опускаються вниз. При цьому, стикаючись зі стінками труб, масло прохолоджується. Трансформаторне масло має високі електроізоляційні властивості, тому, просочуючи ізоляцію обмоток, воно поліпшує її властивості й підвищує надійність трансформаторів при високих напругах. Це особливо важливо для трансформаторів, установлюваних на відкритих площадках. Варто помітити, що масляне охолодження ускладнює й здорожує експлуатацію трансформаторів, тому що вимагає систематичного контролю за якістю масла й періодичної його заміни.

Масляне охолодження з дуттям. Трансформатори постачають електричними вентиляторами, які обдувають радіатори трансформатора. Конвекція масла усередині бака залишається природної. Цей вид охолодження дозволяє збільшити одиничну потужність трансформатора на 40(50%. Звичайно масляне охолодження з дуттям застосовують у трансформаторах потужністю понад 10 000 квт. При зниженні навантаження трансформатора з дутьєвим охолодженням на 50(60% вентилятори можна відключити, тобто перейти на природне масляне охолодження.

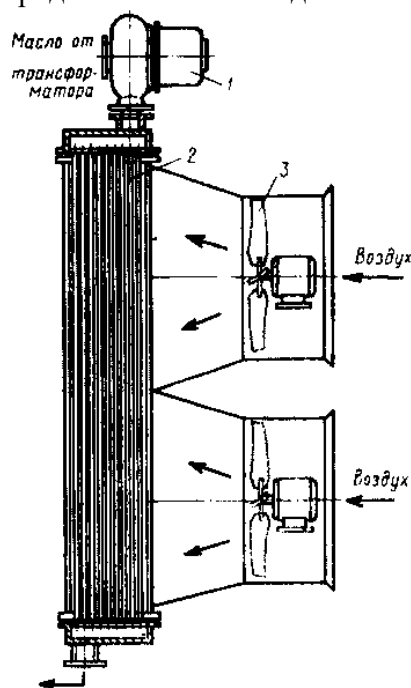


Рис. 5.8. Масляне охолодження трансформатора з дуттям і примусової циркуляції масла

Масляне охолодження з дуттям і примусовою циркуляцією масла. За допомогою насоса 1 (мал. 5.8) створюють примусову циркуляцію трансформаторного масла через спеціальні охолоджувачі 2 зібрані із трубок. Одночасно необхідне число вентиляторів 3 створює спрямовані потоки повітря, що обдувають поверхню трубок охолоджувача.

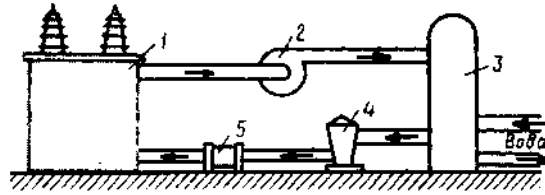


Рис. 5.9. Масляно-водяне охолодження трансформатора

Масляно-водяне охолодження (мал. 5.9). Нагріте в трансформаторі 1 масло за допомогою насоса 2 прогоняється через охолоджувач 3, у якому циркулює вода. Це найбільш ефективний спосіб охолодження, тому що коефіцієнт теплопередачі від масла у воду значно вище, ніж у повітря. Одночасне масло проходить через повітроохолоджувач 4 і фільтр 5, де звільняється від небажаних включень.

Самостійна робота №8

Тема: Трифазні двошарові обмотки з цілим числом пазів на полюс та фазу.

Мета: ознайомитися з принципом виконання трифазної двошарової обмотки із цілим числом пазів на полюс і фазу.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Принцип виконання трифазної двошарової обмотки із цілим числом пазів на полюс і фазу
- 2 Способи з'єднання котушкових груп

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Які є види обмотки статора машини змінного струму?
- 2 Опишіть порядок побудови розгорнутої схеми трифазної двошарової обмотки статора.
- 3 Які переваги та недоліки двошарових обмоток?
- 4 Що таке котушкова група?
- 5 Опишіть порядок побудови розгорнутої схеми трифазної обмотки.
- 6 Які є типи з'єднання котушкових груп?

1 Принцип виконання трифазної двошарової обмотки із цілим числом пазів на полюс і фазу

Обмотки статора машин змінного струму по своїй конструкції розділяються на двох- і одношарові. У двошаровій обмотці пазова сторона котушки займає половину паза по його висоті, а іншу половину цього паза займає пазова сторона іншої котушки (мал. 8.1, а). В одношаровій обмотці статора пазова сторона будь-якої котушки займає весь паз (мал. 8.1, б).

Розглянемо принцип виконання трифазної двошарової обмотки із цілим числом пазів на полюс і фазу q_1 рівним 2; 3; 4 і т.д. У цьому випадку обмотка кожної фази займає q_1 пазів у межах кожного полюсного розподілу. Таким чином, для утворення трифазної обмотки зубцовий шар сердечника статора в межах кожного полюсного розподілу варто розділити на три зони по q_1 пазів у кожній зоні.

Розглянемо порядок побудови розгорнутої схеми трифазної двошарової обмотки статора на прикладі обмотки, що має наступні дані: число фаз $m_1 = 3$, число полюсів $2p = 2$, число пазів у сердечнику статора $Z_1 = 12$, крок обмотки по пазах діаметральний, тобто $y_1 = \tau$.

Крок обмотки $y_1 = Z_1 / (2p) = 12/2 = 6$ пазів; число пазів на полюс і фазу $q_1 = Z_1 / (m_1 2p) = 12 / (3 \cdot 2) = 2$ пази; пазовий кут $\gamma = 360p / Z_1 = 360 \cdot 1/12 = 30$ ел. град. Кут зрушення між осями фазних обмоток становить 120 ел. град, тому зрушення між початками фазних обмоток А, У і С, виражений у пазах, $Z = 120 / \gamma = 120/30 = 4$ пази.

На розгорнутій поверхні статора розмічаємо пази ($Z_1 = 12$) і полюсні розподіли ($2p = 2$), а потім розмічаємо зони по $q_1 = 2$ пази для всіх фаз (мал. 8.2, а); при цьому відстань між зоною якої-небудь фази в одному полюсному розподілі й зоною цієї ж фази в іншому полюсному розподілі повинне бути дорівнює кроку обмотки $y_1 = 6$ пазів.

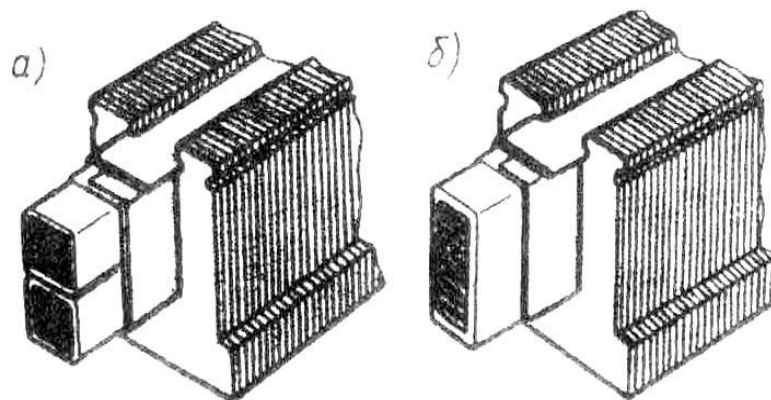


Рис. 8.1. Розташування пазових сторін двошарової (а) і одношарової (б) обмоток статора

Далі відзначаємо відстань між початками фазних обмоток $Z = 4$ пази. Зображуємо на схемі (мал. 8.2, б) верхні (суцільні лінії) і нижні (пунктирні лінії) пазові сторони котушок фази А (котушки 1,2, 7 й 8). Верхню сторону котушки 1

(паз 1) лобовою частиною з'єднуємо з нижньою стороною цієї ж котушки (паз 7), що, у свою чергу, приєднуємо до верхньої сторони котушки 2 (паз 2). Верхню сторону котушки 2 (мал. 8.2, б) також лобовою частиною з'єднуємо з нижньою стороною цієї ж котушки (паз 8) і одержуємо першу котушкову групу обмотки фази А (Н1А- К1А).

Аналогічно одержуємо другу котушкову групу фази А, що складає з послідовно з'єднаних котушок 7 й 8 (Н2А- ДО2А). Котушкові групи з'єднуємо послідовно зустрічно, для чого ДО1А приєднуємо до ДО2А. Приєднавши початок першої котушкової групи Н1А к виводу обмотки 31, а початок другої котушкової групи Н2А - до виводу 34, одержуємо фазну обмотку А.

Приступаємо до з'єднання пазових сторін котушок фази В: к.гармат 5 я 6 (перша катушеч- ная група) і котушок 11 й 12 (друга котушкова група). Проробивши те ж саме з котушками фазної обмотки С и з'єднавши котушкові групи цих фазних обмоток, так само як це було зроблено у фазній обмотці А, одержимо фазні обмотки фази В (32-35) і фази З (С3-С6). В остаточному виді розгорнута схема трифазної обмотки представлена на мал. 8.2, в.

2 Способи з'єднання котушкових груп

Двошарові обмотки в електричних машинах змінного струму одержали найбільше поширення. Це пояснюється рядом переваг, з яких головним є можливість будь-якого вкорочення кроку обмотки, що дає, у свою чергу, возжність максимально наблизити форму кривій ЕРС до синусоїди. Однак двошарові обмотки не позбавлені недоліків- це утруднення в застосуванні верстатного укладання обмотки, а також труднощі ремонту обмотки при ушкодженні ізоляції пазових провідників нижнього шару.

Котушковою групою називають ряд послідовно з'єднаних між собою котушок, які лежать у сусідніх пазах і належать одній фазній обмотці. Кожна котушкова група має q_1 послідовно з'єднаних котушок. Количество котушкових груп в фазній обмотці дорівнює числу полюсів. Загальна кількість котушкових груп у двошарової обмотці дорівнює $2pm_1$.

Котушкові групи кожної фази обмотки статора можуть, бути з'єднані послідовно або паралельно, що впливає на число паралельних галузей в обмотці. На мал. 8.2, б показане послідовне з'єднання двох котушкових груп фазної обмотки, для чого необхідно нижній кінець першої котушкової групи (ДО1А) з'єднати з нижнім кінцем другої котушкової групи (ДО2А), а верхні кінці вивести до затискачів двошарової обмотки статора: $Z_1 = 12$, $2p = 2$, $v_1 = 6$, $q_1 = 2$ фазної обмотки (31-34). При такому з'єднанні котушкових груп ЭДС фазної обмотки являє собою суму ЕРС всіх котушкових груп.

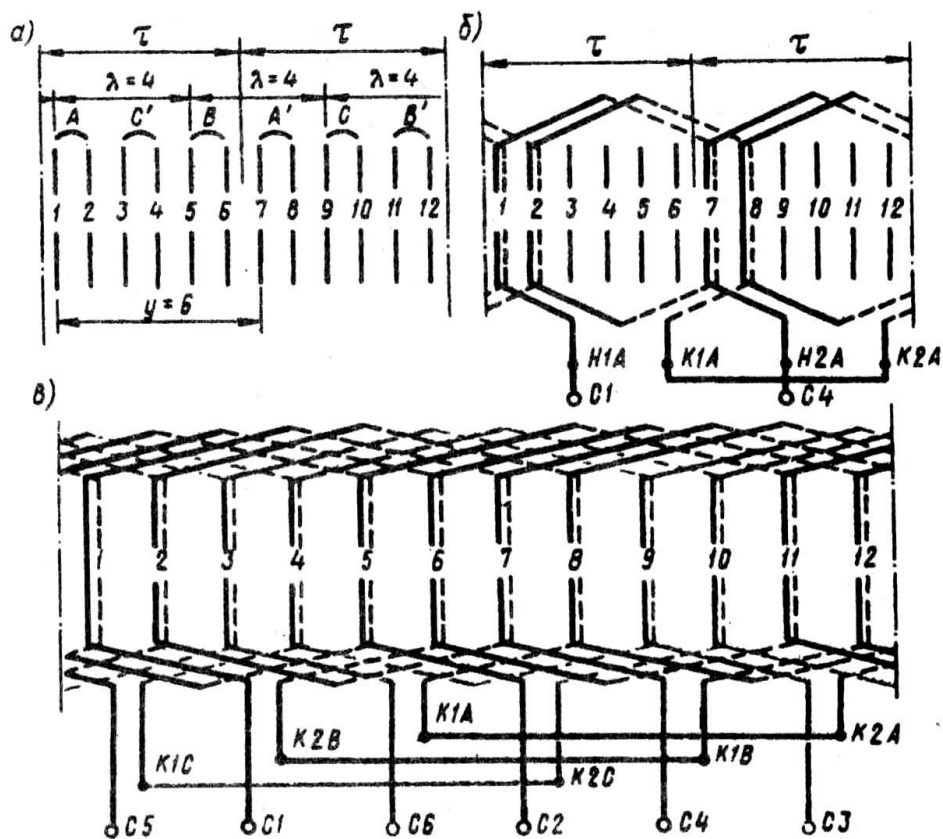


Рис. 8.2. Порядок побудови розгорнутої схеми трифазної обмотки

На мал. 8.3, а показано послідовне з'єднання чотирьох котушкових груп. Перша й друга групи з'єднані нижніми кінцями, друга й третя групи з'єднані верхніми кінцями, третя й четверта — нижніми, а до виводів фазної обмотки приєднані верхні кінці перших і четвертої котушкових груп. При послідовному з'єднанні котушкових груп кожна фаза обмотки незалежно від числа полюсів машини містить одну паралельну галузь ($a_1 = 1$). Двошарова обмотка в кожній фазі має $2p$ котушкових груп, тому, з'єднавши всі групи паралельно, одержимо обмотку, що складається з $2p$ паралельних галузей ($a_1 = 2p$).

На мал. 8.3, б показано паралельне з'єднання чотирьох котушкових груп: до одного виводу обмотки (31) підключені верхні кінці непарних груп (I й III) і нижні кінці парних груп (II й IV), що залишилися кінці котушкових груп приєднані до іншого виводу фазної обмотки (34). Такий порядок приєднання груп порозумівається наступної: ЕРС поруч лежачих котушкових груп однієї фазної обмотки зрушені по фазі друг щодо друга на 180° , тому що ці котушкові групи розташовані під різнойменними полюсами. Тому, щоб ЕРС радом лежачих котушкових груп фазної обмотки збіглися по фазі, доводиться їх приєднувати міняючи кінці.

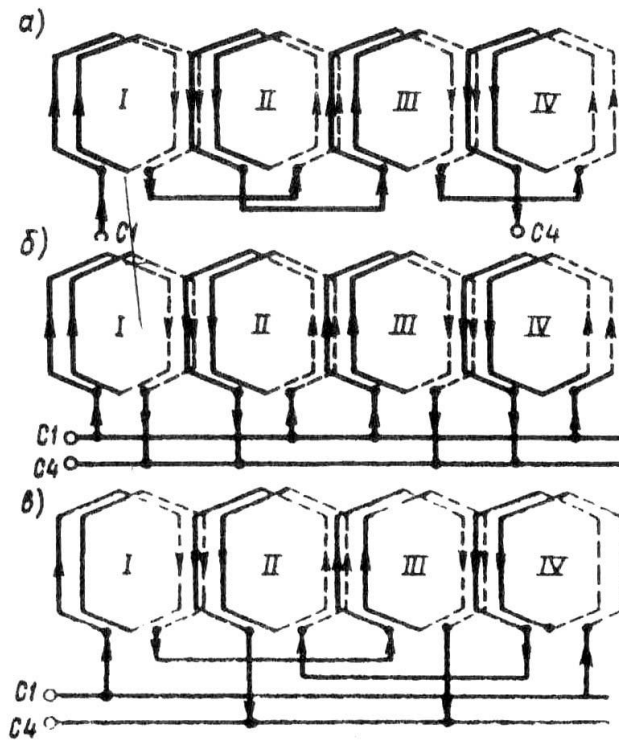


Рис. 8.3 Способи з'єднання котушкових груп

Якщо половину котушкових груп кожної фазної обмотки з'єднати послідовно в одну галузь, а потім дві галузі з'єднати паралельно, то одержимо послідовно-паралельне (змішане) з'єднання котушкових груп із двома паралельними галузями в фазній обмотці ($a_1 = 2$). Щоб ЕДС паралельних галузей були однакові, у кожен паралельну галузь включають котушкові групи через одну. Таким чином, в одній паралельній галузі виявляються всі парні котушкові групи, а в іншій - всі непарні (мал. 8.3, в).

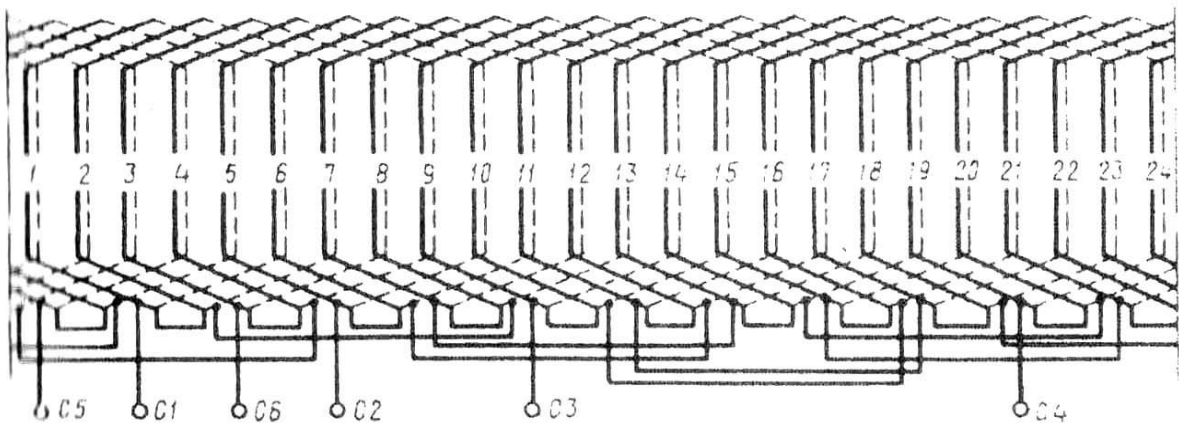


Рис. 8.4. Розгорнута схема трифазної двошарової обмотки статора з укороченим кроком: $Z_1 = 24$; $2p = 4$; $y_1 = 5$

Приклад. Виконати розгорнуту схему трифазної двошарової обмотки з відносним укороченням кроку $p = 0,83$ при наступних даних: $2p = 4$, $Z_1 = 24$, з'єднання котушкових груп послідовне.

Рішення. Число пазів на полюс і фазу по (7.10)

$$q_1 = Z_1 / (2pm) = 24 / (4 \cdot 3) = 2$$

Пазовий кут по (7.13)

$$\gamma = 360p / Z_1 = 360 \cdot 2 / 24 = 30 \text{ эл. град.}$$

Зрушення між осями фаз (у пазях)

$$? = 120 / ? = 120 / 30 = 4.$$

Крок обмотки по пазях

$$y_1 = \beta Z_{1/2p} = 0,83 \cdot 24 / 4 = 5$$

На мал. 8.4 зображена розгорнута схема цієї обмотки.

Самостійна робота №9

Тема: Ізоляція обмоток статора.

Мета: ознайомитися з призначенням ізоляції обмоток статора, її класами.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

1 Загальні поняття

2 Класи ізоляції

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

1 Навіщо необхідна ізоляція обмоток статора?

2 Які є класи нагрівостійкості ізоляції?

3 Як виконують оцінку використання площі паза?

1 Загальні поняття

Електрична ізоляція обмотки - найбільш відповідальний елемент електричної машини, у значній мірі визначальні її габарити, вага, вартість і надійність.

Пазові сторони обмотки статора розташовані в пазах (мал. 8.9), які можуть бути напівзакритими (а), напіввідчиненими (б) і відкритими (в). Перед укладанням провідників 4 обмотки поверхня паза прикривають пазової (корпусної) ізоляцією 2 у вигляді пазової коробочки. Цей вид ізоляції повинен мати не тільки достатню електричну, але й механічну міцність, тому що на нього діють значні механічні сили, що виникають у процесі роботи машини, а особливо в процесі укладання (ущільнення) провідників обмотки в пазах. У нижній частині паза розташовують прокладку 1.

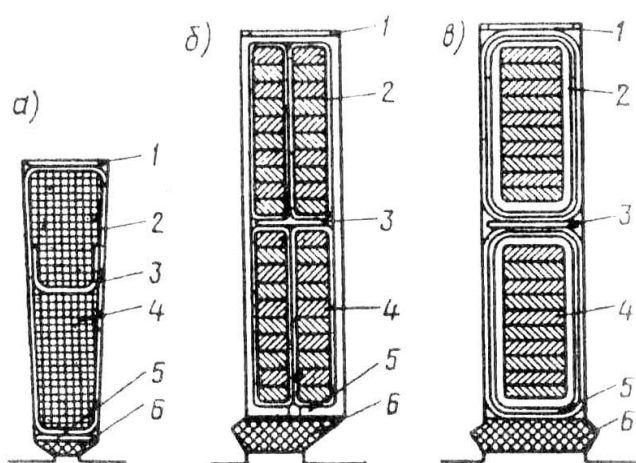


Рис. 8.9. Пази статора

Електрична ізоляція провідників друг від друга забезпечується витковою ізоляцією, у якості якої в машинах напругою до 660 В використовують ізоляцію обмотувальних проводів, а при напрузі 6000 В и вище ця ізоляція вимагає посилення на кожному провіднику спеціальної виткової ізоляцією. У двошарових обмотках між шарами укладають прокладку 3. Паз закривають клином 6, під яким звичайно також кладуть ізоляційну прокладку 5.

2 Класи ізоляції

Спосіб ізоляції паза й застосовувані ізоляційні матеріали залежать від типу обмотки, її робочої напруги й температури перегріву. При виборі електроізоляційних матеріалів для ізоляції паза необхідно, щоб всі матеріали мали однакову нагрівостійкість.

Ізоляційні матеріали, застосовувані в обмотках електричних машин і трансформаторів, розділяють на п'ять класів нагрівостійкості, що відрізняються друг від друга гранично припустимою температурою нагрівання:

Клас нагрівостійкості ізоляції.....	A	E	B	F	H
Гранично припустима температура, °С...	105	120	130	155	180
Розрахункова робоча тим-пература обмотки, °С..	75	75	75	115	115

Клас ізоляції визначає також значення розрахункової робочої температури при розрахунку активного опору обмотки.

В останні роки для обмоток статорів при напрузі до 660 У переважно застосовують проведення з емалевою ізоляцією марок ПЕТВ і ПЕТ-155 круглого й прямокутного перетинів. Основним ізоляційним матеріалом для обмоток статорів служать: у низьковольтних машинах (до 660 В) - пленкосинтокартон, електронит, лакотканеслюдопласт, а у високовольтних машинах (6000 В і вище) - стеклослюдопластова стрічка, стеклотекстолит і т.п.

З метою поліпшення використання габариту машини бажано, щоб ізоляція обмотки в пазах займала менше місця.

Для оцінки використання площі паза користуються коефіцієнтом заповнення паза ізольованими провідниками

$$k_n = N_{n1} d_{из}^2 / S'_n, \quad (8.4)$$

де N_{n1} — число провідників у пазу; $d_{из}$ — діаметр ізольованого провідника, мм; S'_n — площа паза, займана обмоткою (без обліку клина), мм².

При використанні обмотувальних проводів круглого перетину (пази напівзакриті) для ручного укладання обмотки $k_n = 0,70 \div 0,75$, для машинного укладання на статорообмоточних верстатах $k_n = 0,70 \div 0,72$. У високовольтних машинах пази статора роблять відкритими, тому що тільки в цьому випадку можна забезпечити надійну пазову ізоляцію.

Самостійна робота №10

Тема: Приведення параметрів в обмотках АД. Векторна діаграма АД.

Мета: ознайомитися з приведенням параметрів в обмотках АД та принципом побудови векторної діаграми АД; ознайомитися з типами схем заміщення АД.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Приведення параметрів в обмотках АД
- 2 Векторна діаграма АД
- 3 Схема заміщення АД

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Навіщо виконують приведення параметрів в обмотках АД?
- 2 Опишіть порядок побудови векторної діаграми АД.
- 3 Навіщо необхідно будувати схему заміщення АД?
- 4 Побудуйте Г-подібну схему заміщення АД.
- 5 Побудуйте Т-подібну схему заміщення АД.

1 Приведення параметрів в обмотках АД

Щоб вектори ЕРС, напруг і струмів обмоток статора й ротора можна було зобразити на одній векторній діаграмі, треба параметри обмотки ротора привести до обмотки статора, тобто обмотку ротора із числом фаз m_2 , обмотувальним коефіцієнтом k_{o62} і числом витків однієї фазної обмотки ω_2 замінити обмоткою з m_1 , ω_1 й k_{o61} . При цьому потужності й фазові зрушення векторів ЕРС і струмів ротора після приведення повинні залишитися такими ж, що й до приведення. Перерахування реальних параметрів обмотки ротора на наведені виконується по формулах, аналогічним формулам приведення параметрів вторинної обмотки трансформатора.

При $s = 1$ наведена ЕРС ротора

$$E'_2 = E_2 k_e, \quad (12.17)$$

де $k_e = E_1 / E_2 = k_{o61} \omega_1 / (k_{o62} \omega_2)$ - коефіцієнт трансформації напруги в асинхронній машині при нерухомому роторі.

Наведений струм ротора

$$I'_2 = I_2 / k_i, \quad (12.18)$$

де $k_i = m_1 \omega_1 k_{o61} / (m_2 \omega_2 k_{o62}) = m_1 k_e / m_2$ - коефіцієнт трансформації струму асинхронної машини.

На відміну від трансформаторів в асинхронних двигунах коефіцієнти трансформації напруги й струми не рівні ($k_e \neq k_i$). Пояснюється це тим, що число фаз в обмотках статора й ротора в загальному випадку не однакове ($m_1 \neq m_2$). Лише у двигунах з фазним ротором, у яких $m_1 = m_2$, ці коефіцієнти рівні.

Активні й індуктивне наведені опори обмотки ротора:

$$\begin{aligned} r'_2 &= r_2 k_e k_i; \\ x_2 &= x_2 k_e k_i. \end{aligned} \quad (12.19)$$

Варто звернути увагу на деяку специфіку визначення числа фаз m_2 і числа витків ω_2 для короткозамкненої обмотки ротора. Кожен стержень цієї обмотки розглядають як одну фазу, а тому число витків однієї фази короткозамкненої обмотки ротора $\omega_2 = 0,5$; обмотувальний коефіцієнт такої обмотки $k_{o62} = 1$, а число фаз $m_2 = Z_2$, тобто дорівнює числу стрижнів у короткозамкненій обмотці ротора.

Подставивши в (12.9) наведені значення параметрів обмотки ротора E'_2 , I'_2 , r_2 й x_2 , одержимо рівняння напруг обмотки ротора в наведеному виді:

$$\dot{E}'_2 - j \dot{I}'_2 x_2 - \dot{I}'_2 r'_2 / s = 0 \quad (12.20)$$

Величину r'_2 / s можна представити у вигляді

$$\frac{r'_2}{s} = \frac{r'_2}{s} - \frac{r'_2 s}{s} + r'_2 = r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s} \quad (12.21)$$

тоді рівняння ЕРС для ланцюга ротора в наведених параметрах прийме вид

$$0 = \dot{E}'_2 - j \dot{I}'_2 x_2 - \dot{I}'_2 r'_2 (1-s) / s. \quad (12.22)$$

2 Векторна діаграма АД

Для асинхронного двигуна (так само як і для трансформатора) можна побудувати векторну діаграму. Підставою для побудови цієї діаграми є рівняння струмів (12.14) і рівняння напруг обмоток статора (12.3) і ротора (12.22).

Кут зрушення фаз між ЕРС \dot{E}'_2 і струмом \dot{I}'_2

$$\Psi_2 = \arctg(x'_{2s}/r'_2).$$

Так як векторну діаграму асинхронного двигуна будують по рівняннях напруг і струмів, аналогічним рівнянням трансформатора, то порядок побудови цієї діаграми такий же, що й векторної діаграми трансформатора.

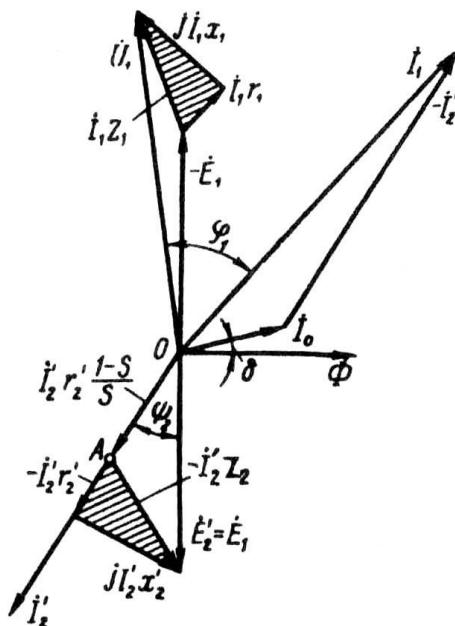


Рис. 12.1 Векторна діаграма асинхронного двигуна

На мал. 12.1 представлена векторна діаграма асинхронного двигуна. Від векторної діаграми трансформатора вона відрізняється тим, що сума спадань напруги в обмотці ротора (у вторинній обмотці) урівноважується ЕРС \dot{E}'_2 обмотки нерухомого ротора ($n_2 = 0$), тому що обмотка ротора замкнута накоротко. Однак якщо спадання напруги $\overline{OA} = \dot{I}'_2 r'_2 (1-s)/s$ розглядати як напругу на деякому активному навантаженні $r'_2 (1-s)/s$, підключеної на затискачі нерухомого ротора, то векторну діаграму асинхронного двигуна можна розглядати як векторну діаграму трансформатора, на затискачі вторинної обмотки якого підключене змінний активний опір $r'_2 (1-s)/s$. Інакше кажучи, асинхронний двигун в електричному відношенні подібний до трансформатора працюючому на чисто активне навантаження. Активна потужність вторинної обмотки такого трансформатора являє собою повну механічну потужність, що розвиває асинхронним двигуном.

$$P'_2 = m_1 I_2'^2 r'_2 (1-s)/s \quad (12.23)$$

3 Схема заміщення АД

Рівнянням напруг і струмів, а також векторній діаграмі асинхронного двигуна відповідає електрична схема заміщення асинхронного двигуна.

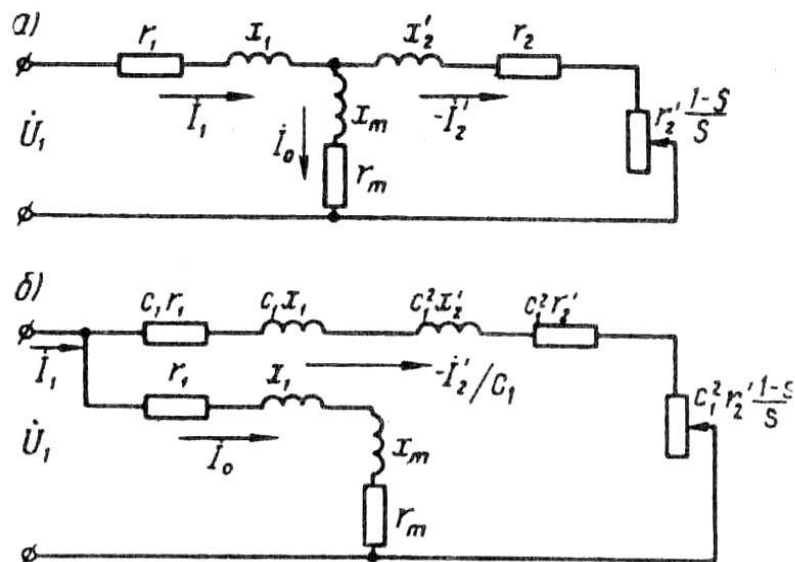


Рис. 12.2. Схеми заміщення асинхронного

На мал. 12.2, а представлена Т-образная схема заміщення. Магнітний зв'язок обмоток статора й ротора в асинхронному двигуні на схемі заміщення замінений електричним зв'язком ланцюгів статора й ротора. Активний опір можна розглядати як зовнішній опір, включений в обмотку нерухомого ротора. У цьому випадку асинхронний двигун аналогічний трансформатору, що працює на активне навантаження. Опір— єдиний змінний параметр схеми. Значення цього опору визначається ковзанням, а отже, механічним навантаженням на валу двигуна. Так, якщо навантажувальний момент на валу двигуна $M_2 = 0$, то ковзання $s \approx 0$. При цьому $r_2' (1 - s) / s = \infty$, що відповідає роботі двигуна в режимі х.х. Якщо ж навантажувальний момент на валу двигуна перевищує його обертаючий момент, то ротор зупиняється ($s = 1$). При цьому $r_2'(1 - s) / s = \text{ПРО}$, що відповідає режиму к. з. асинхронного двигуна.

Більше зручної для практичного застосування є Г- образна схема заміщення (мал. 12.2, б), у якої контур, що намагнічує ($Z_m = r_m + j x_m$) винесений на вхідні затискачі схеми заміщення. Щоб при цьому струм, що намагнічує, I_0 не змінив свого значення, у цей контур послідовно включають опору обмотки статора r_1 і i_1 . Отримана в такий спосіб схема зручна тим, що вона складається із двох паралельно з'єднаних контурів: намагничуючого зі струмом I_0 і робітника зі струмом $-I_2'$. Розрахунок параметрів робочого контуру Г-образної схеми заміщення вимагає уточнення, що досягається введенням у розрахункові формули коефіцієнта z_1 (мал. 12.2, б), що представляє собою відношення напруги мережі U_1 до ЕДС статора E_1 при ідеальному холостому ході ($s = 0$) [1]. Тому що в цьому режимі струм холостого ходу асинхронного двигуна досить малий, то U_1 виявляється лише деяким більше, ніж ЕРС E_1 , а їхнє відношення $z_1 = U_1 / E_1$ мало відрізняється від одиниці. Для двигунів потужністю 3 квт і більше $z_1 = 1,05 \div 1,02$, тому з метою полегшення аналізу виражень, що характеризують властивості асинхронних двигунів і спрощення практичних розрахунків, приймемо $z_1 = 1$. Виниклі при цьому неточності не перевищать значень, припустимих при технічних розрахунках.

Наприклад, при розрахунку струму ротора I'_2 ця помилка складе від 2 до 5 % (менші значення ставляться до двигунів більшої потужності).

Скориставшись Γ -подібною схемою заміщення й прийнявши $z_1 = 1$, запишемо вираження струму в робочому контурі:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{[r_1 + r'_2 + r'_2(1-s)/s]^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad (12.24)$$

або з обліком (12.21) одержимо

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad (12.25)$$

Знаменник вираження (12.25) являє собою повний опір робочого контуру Γ -подібної схеми заміщення асинхронного двигуна.

Самостійна робота №11

Тема: Електромагнітний момент і механічні характеристики АД.

Мета: вивчити поняття електромагнітного моменту АД, побудувати механічні характеристики АД.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Електромагнітний момент асинхронного двигуна
- 2 Механічні характеристики асинхронного двигуна

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Дайте визначення електромагнітного моменту АД.
- 2 Побудуйте графік залежності електромагнітного моменту від ковзання.
- 3 Дайте визначення механічної характеристики АД.
- 4 Що таке критичне ковзання?
- 5 Навіщо використовують механічні характеристики АД?
- 6 Що таке статичний момент АД?
- 7 Побудуйте та проаналізуйте механічну характеристику АД.
- 8 Виведіть спрощену формулу розрахунку механічної характеристики АД.

1 Електромагнітний момент асинхронного двигуна

Електромагнітний момент асинхронного двигуна створюється взаємодією струму в обмотці ротора з обертовим магнітним полем. Електромагнітний момент M пропорційний електромагнітній потужності:

$$M = P_{em}/\omega_1 \quad (13.11)$$

де

$$\omega_1 = 2\pi n_{1/60} = 2\pi f_1 \quad (13.12)$$

- кутова синхронна швидкість обертання.

Підставивши в (13.11) значення електромагнітної потужності по (13.5), одержимо

$$M = P_{s2}/(\omega_1 s) = m_1 I'^2_2 r'_2/(\omega_1 s) \quad (13.13)$$

тобто електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний потужності електричних втрат в обмотці ротора.

Якщо значення струму ротора по вираженню (12.25) підставити в (13.13), то одержимо формулу електромагнітного моменту асинхронної машини (Н• м):

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r'_2 p}{2\pi f s [(r_1 + r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2]} \quad (13.14)$$

Параметри схеми заміщення асинхронної машини r_1 , r'_2 , x_1 і x'_2 , що входять у вираз (13.14), є постійними, тому що їхнього значення при змінах навантаження машини залишається практично незмінними. Також постійними можна вважати напруга на обмотці фази статора U_1 і частоту f_1 . У виразі моменту M єдина змінна величина - ковзання s , що для різних режимів роботи асинхронної машини може приймати різні значення в діапазоні від $+s$ до $-s$.

Розглянемо залежність моменту від ковзання $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ і постійних параметрах схеми заміщення. Цю залежність прийнято називати механічною характеристикою асинхронної машини. Аналіз вираження (13.14), що представляє собою аналітичне вираження механічної характеристики $M = f(s)$, показує, що при значеннях ковзання $s = 0$ й $s = \infty$ електромагнітний момент $M = 0$. Із цього треба, що механічна характеристика $M = f(s)$ має максимум.

Для визначення величини критичного ковзання s_{kp} , що відповідає максимальному моменту, необхідно взяти першу похідну від (13.14) і дорівняти її нулю: $d/ds = 0$. У результаті отримаємо:

$$s_{kp} = \pm r'_2 / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (13.15)$$

Підставивши значення критичного ковзання (по 13.15) у вираження електромагнітного моменту (13.14), після ряду перетворень одержимо вираження максимального моменту (Нм):

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}]} \quad (13.16)$$

В (13.15) і (13.16) знак плюс відповідає руховому, а знак мінус - генераторному режиму роботи асинхронної машини.

Для асинхронних машин загального призначення активний опір обмотки статора r_1 набагато менше суми індуктивних опорів: $r_1 \ll (x_1 + x'_2)$. Тому, зневажаючи величиною r_1 , одержимо спрощені вираження критичного ковзання

$$s_{кр} \approx \pm r'_2 / (x_1 + x'_2) \quad (13.17)$$

і максимального моменту (Нм)

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 (x_1 + x'_2)_1} \quad (13.18)$$

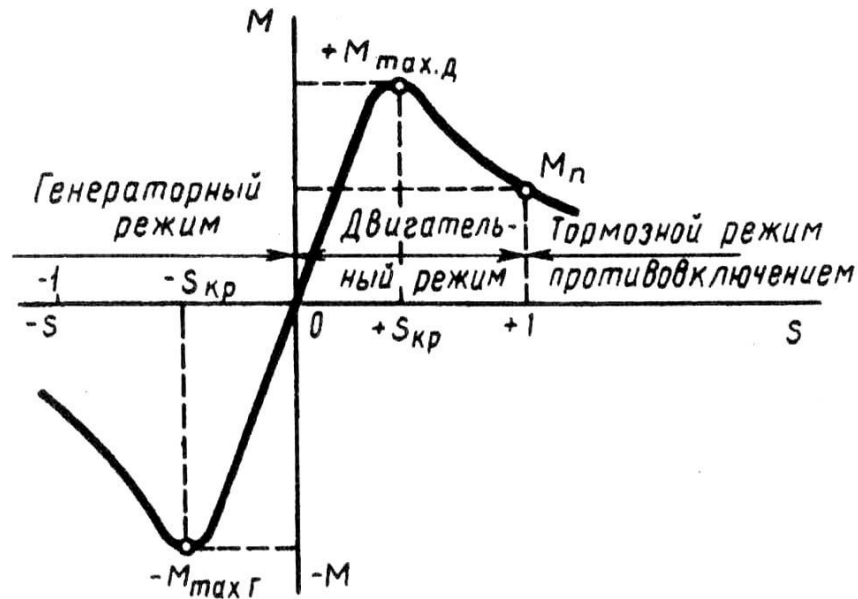


Рис. 13.2. Залежність режимів роботи асинхронної машини від ковзання

Аналіз вираження (13.16) показує, що максимальний момент асинхронної машини в генераторному режимі більше, ніж у руховому ($M_{max \Gamma} > M_{max \text{ д}}$). На мал. 13.2 показана механічна характеристика асинхронної машини $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$. На цій характеристиці зазначені зони, що відповідають різним режимам роботи: руховий режим ($0 < s < 1$), коли електромагнітний момент M є обертаючим; генераторний режим ($-1 < s < 0$) і гальмовий режим противовключением ($1 < s < + \infty$), коли електромагнітний момент M є гальмуючим.

З (13.14) бачимо, що електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги мережі:

$$M \equiv U_1^2.$$

Це в значній мірі відбивається на експлуатаційних властивостях двигуна: навіть невелике зниження напруги мережі викликає помітне зменшення обертаючого моменту асинхронного двигуна. Наприклад, при зменшенні напруги на 10% щодо номінального ($U_1 = 0,9U_{ном}$) електромагнітний момент двигуна зменшується на 19% : $M' = 0,9^2 M$, де M — момент при номінальній напрузі мережі, а M' — момент при зниженій напрузі.

2 Механічні характеристики асинхронного двигуна

Для аналізу роботи асинхронного двигуна зручніше скористатися механічною характеристикою $M = f(s)$, представленою на мал. 13.3. При включенні двигуна в мережу магнітне поле статора, не маючи інерцію, відразу ж починає обертання із синхронною частотою n_1 , у той же час ротор двигуна під впливом сил інерції в початковий момент пуску залишається нерухомим ($n_2 = 0$) і ковзання $s = 1$.

Підставивши в (13.14) ковзання $s = 1$, одержимо вираження пускового моменту асинхронного двигуна (M_n):

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{4\pi f_1 [(x_1 + x_2')^2 + (x_1' + x_2)^2]} \quad (13.19)$$

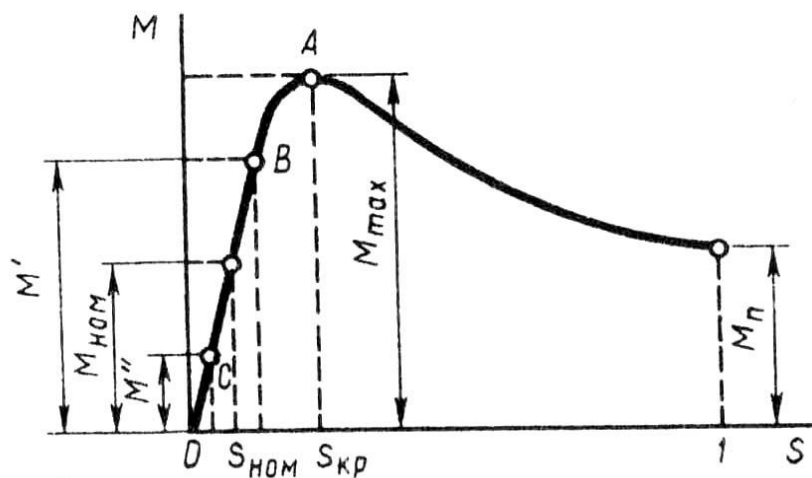


Рис 13.3. Залежність електромагнітного моменту асинхронного двигуна від ковзання

Під дією цього моменту починається обертання ротора двигуна, при цьому ковзання зменшується, а обертаючий момент зростає відповідно до характеристики $M = f(s)$. При критичному ковзанні s_{kp} момент досягає максимального значення M_{max} . З подальшим наростанням частоти обертання (зменшенням ковзання) момент M починає спадати, поки не досягне сталого значення, рівного сумі протидіючих моментів, прикладених до ротора двигуна: моменту $x.x.$ M_0 і корисного навантажувального моменту (моменту на валу двигуна) M_2 , тобто:

$$M = M_0 + M_2 = M_{cm} \quad (13.20)$$

Варто мати на увазі, що при ковзаннях, близьких до одиниці (пусковий режим двигуна), параметри схеми заміщення асинхронного двигуна помітно змінюють свої значення. Порозумівається це в основному двома факторами: посиленням магнітного насичення зубцових шарів статора й ротора, що веде до зменшення індуктивних опорів розсіювання x_1 і x_2' , і ефектом витиснення струму в стрижнях ротора, що веде до збільшення активного опору обмотки ротора r_2' . Тому параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, використовувані при

розрахунку електромагнітного моменту по (13.14), (13.16) і (13.18), не можуть бути використані для розрахунку пускового моменту по (13.19).

Статичний момент $M_{ст}$ дорівнює сумі протидіючих моментів при рівномірному обертанні ротора ($n_2 = const$). Допустимо, що протидіючий момент на валу двигуна M_2 відповідає номінальному навантаженню двигуна. У цьому випадку устано режим, що вився, роботи двигуна визначиться крапкою на механічній характеристиці з координатами $M = M_{ном}$ й $s = s_{ном}$, де $M_{ном}$ й $s_{ном}$ - номінальні значення електромагнітного моменту й ковзання.

З аналізу механічної характеристики також треба, що усталена робота асинхронного двигуна можлива при ковзаннях менше критичного ($s < s_{кр}$), тобто на ділянці ОА механічної характеристики. Справа в тому, що саме на цій ділянці зміна навантаження на валу двигуна супроводжується відповідною зміною електромагнітного моменту. Так, якщо двигун працював у номінальному режимі ($M_{ном}; s_{ном}$), то мало місце рівність моментів: $M_{ном} = M_0 + M'_2$. Якщо відбулося збільшення навантажувального моменту M_2 до значення M'_2 , то рівність моментів порушиться, тобто $M_{ном} < M_0 + M'_2$, і частота обертання ротора почне убавати (ковзання буде збільшуватися). Це приведе до росту електромагнітного моменту до значення $M' = M_0 + M'_2$ (крапка В), після чого режим роботи двигуна знову стане сталої. Якщо ж при роботі двигуна в номінальному режимі відбудеться зменшення навантажувального моменту до значення M''_2 то рівність моментів знову порушиться, по тепер обертаючий момент виявиться більше суми протидіючих: $M_{ном} > M_0 + M''_2$. Частота обертання ротора почне зростати (ковзання буде зменшуватися), і це приведе до зменшення електромагнітного моменту M до значення $M'' = M_0 + M''_2$ (крапка З); стійкий режим роботи буде знову відновлений, але вже при інших значеннях M и s .

Робота асинхронного двигуна стає нестійкою при ковзаннях $s \geq s_{кр}$. Так, якщо електромагнітний момент двигуна $M = M_{max}$, а ковзання $s = s_{кр}$, то навіть незначне збільшення навантажувального моменту M_2 , викликавши збільшення ковзання s , приведе до зменшення електромагнітного моменту M . За цим слідує подальше збільшення ковзання й т.д., поки ковзання не досягне значення $s = 1$, тобто поки ротор двигуна не зупиниться.

Таким чином, при досягненні електромагнітним моментом максимального значення настає край усталеної роботи асинхронного двигуна. Отже, для усталеної роботи двигуна необхідно, щоб сума навантажувальних моментів діючих на ротор, була менше максимального моменту $M_{ст} = (M_0 + M_2) < M_{max}$. Але щоб робота асинхронного двигуна була надійною і щоб випадкові короточасні навантаження не викликали зупинок двигуна, необхідно, щоб ві мав перевантажувальну здатність. Перевантажувальна здатність двигуна λ визначається відношенням максимального моменту M_{max} до номінального $M_{ном}$. Для асинхронних двигунів загального призначення перевантажувальна здатність становить $\lambda = M_{max} / M_{ном} = 1,7 \div 2,5$.

Варто також звернути увагу на те, що робота двигуна при ковзанні $s < s_{кр}$ тобто на робочій ділянці механічної характеристики, є найбільш економічною, бо вона відповідає малим значенням ковзання, а отже, і меншим значенням електричних втрат в обмотці ротора $P_{\epsilon 2} = s P_{эм}$.

Застосування формули (13.14) для розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів не завжди можливо, тому що параметри схеми заміщення двигунів звичайно не приводяться в каталогах і довідниках, тому для практичних розрахунків звичайно користуються спрощеною формулою моменту. В основу цієї формули покладене допущення, що активний опір обмотки статора асинхронного двигуна $r_1 = 0$, при цьому:

$$M = M_{max} \frac{2}{s / s_{кр} + s_{кр} / s} \quad (13.21)$$

Критичне ковзання визначають по формулі

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (13.22)$$

Розрахунок механічної характеристики набагато спрощується, якщо його вести у відносних одиницях $M_* = M / M_{ном}$. У цьому випадку рівняння механічної характеристики має вигляд

$$M_* = \frac{2}{s / s_{кр} + s_{кр} / s} \quad (13.23)$$

Застосування спрощеної формули (13.23) найбільше доцільно при розрахунку робочої ділянки механічної характеристики й при ковзаннях $s < s_{кр}$, тому що в цьому випадку величина помилки не перевищує значень, припустимих для технічних розрахунків. При ковзаннях $s > s_{кр}$ помилка може досягати 15—17%.

Самостійна робота №12

Тема: Робочі характеристики АД. Дослід х. х. та к. з. АД.

Мета: ознайомитися з робочими характеристиками АД; вивчити порядок виконання досліду х. х. та к. з. АД.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Робочі характеристики асинхронного двигуна
- 2 Дослід холостого ходу
- 3 Дослід короткого замикання

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Для чого будують робочі характеристики АД?
- 2 Побудуйте залежність $M_2 = f(P_2)$.
- 3 Побудуйте залежність $\cos \varphi_1 = f(P_2)$.
- 4 Опишіть порядок виконання досліду х. х. АД.
- 5 Опишіть порядок виконання досліду к. з. АД.

1 Робочі характеристики асинхронного двигуна

Робочі характеристики асинхронного двигуна (рисунок 13.7) представляють собою графічно виражені залежності частоти обертання n_2 , КПД η , корисного моменту (моменту на валу) M_2 , коефіцієнта потужності $\cos \varphi$, і струму статора I_1 від корисної потужності P_2 при $U_1 = \text{const}$ $f_1 = \text{const}$.

Швидкісна характеристика $n_2 = f(P_2)$. Частота обертання ротора асинхронного двигуна $n_2 = n_1(1 - s)$.

Ковзання

$$s = P_{\text{э2}} / P_{\text{эм}}, \quad (13.24)$$

тобто ковзання двигуна, а отже, і його частота обертання визначаються відношенням електричних втрат у роторі до електромагнітної потужності $P_{\text{эм}}$. Зневажаючи електричними втратами в роторі в режимі холостого ходу, можна прийняти $P_{\text{э2}} = 0$, а тому $s \approx 0$ й $n_{20} \approx n_1$. У міру збільшення навантаження на валу двигуна відношення (13.24) росте, досягаючи значень 0,01—0,08 при номінальному навантаженні. Відповідно до цього залежність $n_2 = f(P_2)$ являє собою криву, слабо нахилену до осі абсцис. Однак при збільшенні активного опору ротора r_2' кут нахилу цій кривій збільшується. У цьому випадку зміни частоти обертання n_2 при коливаннях навантаження P_2 зростають. Порозумівається це тим, що зі збільшенням r_2' зростають електричні втрати в роторі.

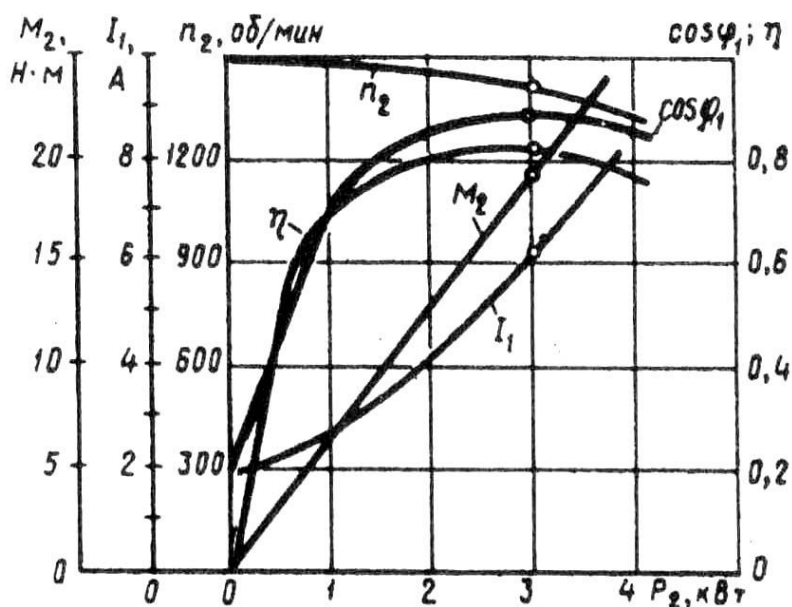


Рис. 13.7. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Залежність $M_2 = f(P_2)$. Залежність корисного моменту на валу двигуна M_2 від корисної потужності P_2 визначається виразом

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = 60 P_2 / (2\pi n_2) = 9,55 P_2 / n_2, \quad (13.25)$$

де P_2 — корисна потужність, Вт; $\omega_2 = 2\pi f_{2/60}$ — кутова частота обертання ротора.

Із цього виразу бачимо, що якщо $n_2 = \text{const}$, те графік $M_2 = f_2(P_2)$ являє 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 не скільки швидше навантаження, а отже, графік $M_2 = f(P_2)$ має криволінійний вигляд.

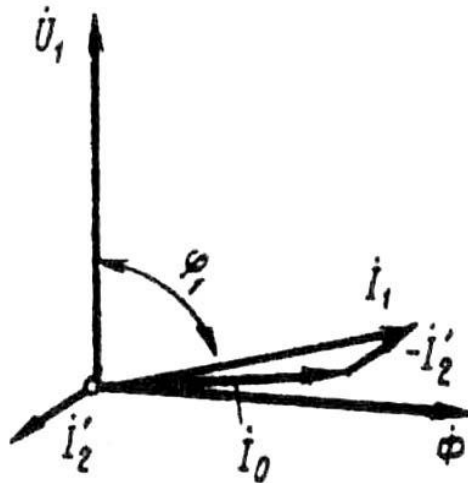


Рис. 13.8. Векторна діаграма асинхронного двигуна при невеликому навантаженні

Залежність $\cos \varphi_1 = f(P_2)$. У зв'язку з тим що струм статора I_1 має реактивну (індуктивну) складову, необхідну для створення магнітного поля в статорі, коефіцієнт потужності асинхронних двигунів менше одиниці. Найменше значення коефіцієнта потужності відповідає режиму х.х. Порозумівається це тим, що струм х.х. I_0 при будь-якому навантаженні залишається практично незмінним. Тому при малих навантаженнях двигуна струм статора невеликий й у значній частині є реактивним ($I_1 \approx I_0$). У результаті зрушення по фазі струму статора I_1^* , щодо напруги U_1^* , виходить значним ($\varphi_1 \approx \varphi_0$), лише деяким менше 90° (мал. 13.8). Коефіцієнт потужності асинхронних двигунів у режимі х.х. звичайно не перевищує 0,2. При збільшенні навантаження на валу двигуна росте активна складова струму I_1 й коефіцієнт потужності зростає, досягаючи найбільшого значення (0,80—0,90) при навантаженні, близької до номінального. Подальше збільшення навантаження супроводжується зменшенням $\cos \varphi_1$ що порозумівається зростанням індуктивного опору ротора (x_{2s}) за рахунок збільшення ковзання, а отже, і частоти струму в роторі. З метою підвищення коефіцієнта потужності асинхронних двигунів надзвичайно важливо, щоб двигун працював завжди або принаймні значну частину часу з навантаженням, близької до номінального. Це можна забезпечити лише при правильному виборі потужності двигуна. Якщо ж двигун працює значну частину часу недовантаженим, то для підвищення $\cos \varphi_1$, доцільно подвоєне до двигуна напруга U_1 зменшити. Наприклад, у двигунах, що працюють при з'єднанні обмотки статора трикутником, це можна зробити Perez'єднавши обмотки статора в зірку, що викличе зменшення фазної напруги в $\sqrt{3}$ раз. При цьому магнітний потік статора, а отже, і струм, що намагнічує, зменшуються приблизно $\sqrt{3}$ в раз. Крім того, активна складова струму статора трохи збільшується. Все це сприяє підвищенню коефіцієнта потужності двигуна.

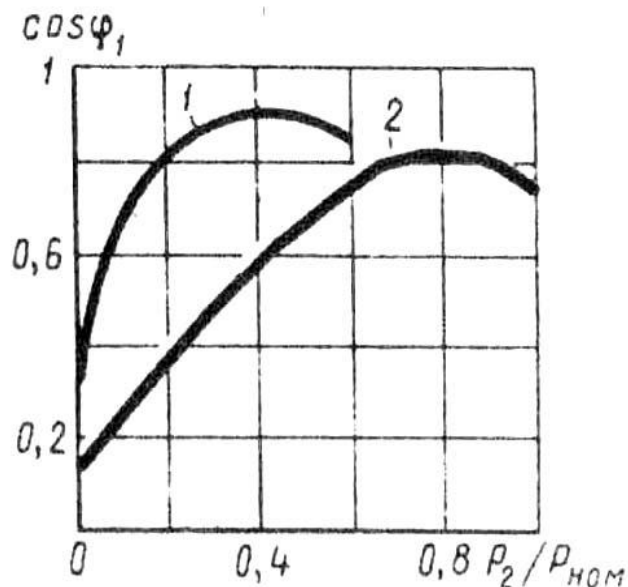


Рис. 13.9. Залежність $\cos \varphi_1$ від навантаження при з'єднанні обмотки статора зіркою (1) і трикутником (2)

На мал. 13.9 представлені графіки залежності $\cos \varphi_1$ асинхронного двигуна від навантаження при з'єднанні обмоток статора зіркою (крива 1) і трикутником (крива 2).

2 Дослід холостого ходу

Живлення асинхронного двигуна при досліді х.х. здійснюється через індукційний регулятор напруги ІР (мал. 14.1) або регулювальний автотрансформатор, що дозволяють змінювати напругу в широких межах. При цьому вал двигуна повинен бути вільним від механічного навантаження.

Досвід починають із підвищеної напруги живлення $U_1 = 1,15 U_{\text{ном}}$, потім поступово знижують напругу до $0,4 U_{\text{ном}}$ так, щоб зняти показання приладів в 5—7 крапках. При цьому один з вимірів повинен відповідати номінальній напрузі $U_{1\text{ном}}$. Вимірюють лінійні значення напруг і струмів й обчислюють їхні середні значення:

$$U_{\text{ср}} = (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) / 3 \quad (14.1)$$

$$I_{0\text{порівн}} = (I_{OA} + I_{OB} + I_{OC}) / 3 \quad (14.2)$$

а потім залежно від схеми з'єднання обмотки статора визначають фазні значення напруги й струму х.х.: при з'єднанні в зірку

$$U_1 = U_{\text{ср}} / \sqrt{3}; \quad I_0 = I_{\text{ср}} \quad (14.3)$$

при з'єднанні в трикутник

$$U_1 = U_{\text{ср}}; \quad I_0 = I_{0\text{ср}} / \sqrt{3} . \quad (14.4)$$

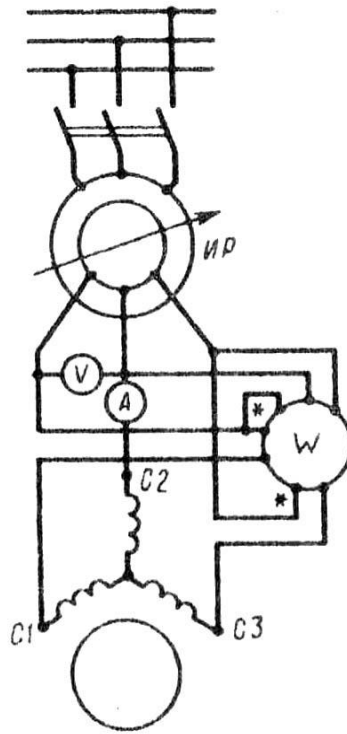


Рис. 14,1. Схема включення трифазного асинхронного двигуна при досвідах х.х. і к.з.

Ваттметр W вимірює активну потужність P_0 , споживану двигуном у режимі х.х., що містить у собі електричні втрати в обмотці статора $m_1 I_0^2 r_1$, магнітні втрати в сердечнику статора P_m і механічні втрати $P_{мех}$ (Вт):

$$P_0 = m_1 I_0^2 r_1 + P_m + P_{мех} \quad (14.5)$$

Тут r_1 - активний опір фази обмотки статора (Ом), обмірюване безпосередньо після відключення двигуна від мережі, щоб обмотка не встигла остудитися.

Сума магнітних і механічних втрат двигуна (Вт)

$$P'_0 = P_m + P_{мех} = P_0 - m_1 I_0^2 r_1 \quad (14.6)$$

Коефіцієнт потужності для режиму х.х.

$$\cos \varphi_0 = P'_0 / (m_1 U_1 I_0). \quad (14.7)$$

За результатами вимірів й обчислень будують характеристики х.х. I_0 , P_0 , P'_0 і $\cos \varphi_0 = f(U_1)$, на яких відзначають значення величин $I_{0ном}$, $P_{0ном}$, $P'_{0ном}$ і $\cos \varphi_0$ відповідній номінальній напрузі $U_{1ном}$ (мал. 14.2).

Якщо графік $P'_0 = f(U_1)$ продовжити до перетинання з віссю ординат ($U_1 = 0$), то одержимо величину втрат $P_{мех}$.

Це поділ магнітних і механічних втрат засноване на тім, що при незмінній частоті мережі f_1 частота обертання двигуна в режимі х.х. n_0 , а отже, і механічні втрати $P_{мех}$ незмінні. У той же час магнітний потік Φ прямо пропорційний ЕРС статора E_1 . Для режиму х.х. $U_1 \approx E_1$, а тому при $U_1 = 0$ і магнітний потік $\Phi = 0$, а отже, і магнітні втрати $P_m = 0$.

Визначивши величину механічних втрат $P_{мех}$, можна обчислити магнітні втрати (Вт):

$$P_m = P'_0 - P_{мех} \quad (14.8)$$

Для асинхронних двигунів з фазним ротором у досвіді холостого ходу визначають коефіцієнт трансформації напруг між обмотками статора й ротора.

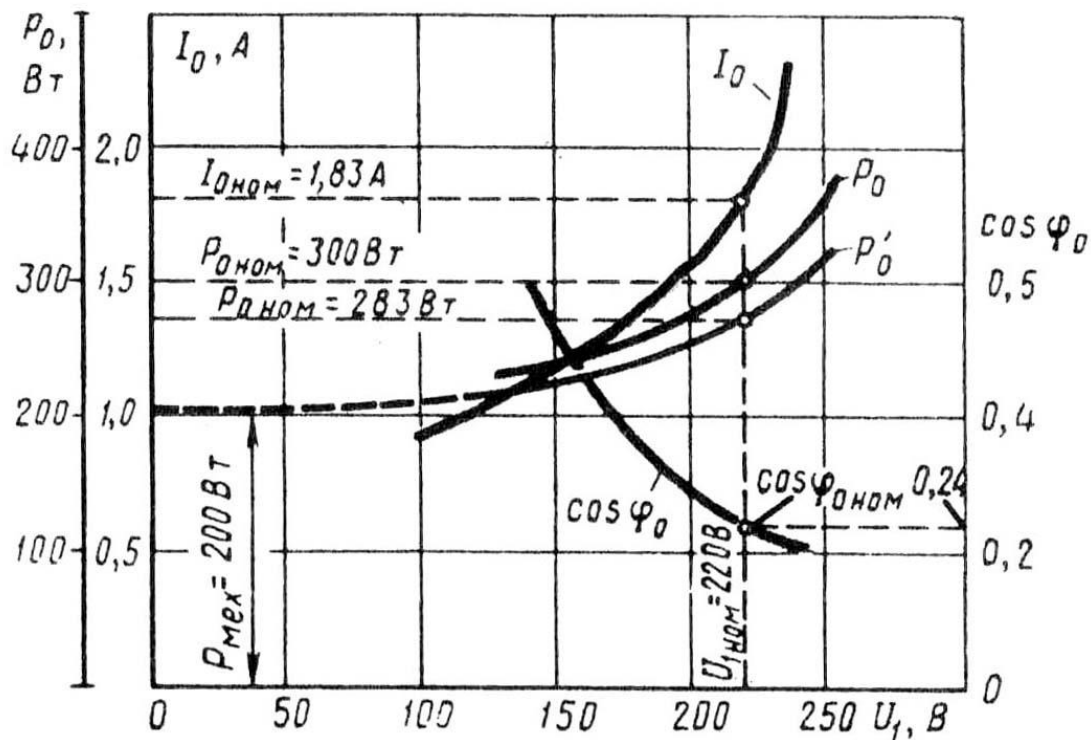


Рис. 14.2. Характеристики х.х. трифазного асинхронного двигуна (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/хв)

Цей коефіцієнт із достатньою точністю може бути визначений по відношенню середніх арифметичних лінійних (междуфазовых) напруг статора до аналогічних напруг ротора.

3 Дослід короткого замикання

Схема з'єднань асинхронного двигуна при досліді к. з. залишається, як й при досліді х.х. (див. мал. 14.1). Але при цьому вимірювальні прилади повинні бути обрані відповідно до меж виміру струму, напруги й потужності. Ротор двигуна варто жорстко закріпити, попередньо встановивши його в положення, що відповідає середньому струму к. з. Із цією метою до двигуна підводять невелику напругу ($U_K = 0,1U_{ном}$) і, повільно повертаючи ротор, стежать за показанням амперметра, стрілка якого буде коливатися залежно від положення ротора двигуна. Пояснюється це взаємним зсувом зубцевих зон ротора й статора, що викликає коливання індуктивних опорів обмоток двигуна.

Граничне значення струму статора при досліді к. з. установлюють виходячи із припустимого струмового навантаження живильної мережі й можливості провести досвід у мінімальний строк, щоб не викликати небезпечного перегріву двигуна. Для двигунів потужністю до 1 кВт можливо проведення досвіду починаючи з номінальної напруги $U_K = 0,1U_{ном}$. У цьому випадку граничний струм $I_K = (1,5 \div 2,5) \times I_{1ном}$. Для двигунів більшої потужності сила граничного струму $I_K =$

$(2,5 \div 5) \times I_{\text{ном}}$. При виконанні досвіду к. з. у навчальних цілях можна обмежитися граничним струмом $I_k = (1,5 \div 2,5) \times I_{\text{ном}}$. При виконанні досвіду к.з. бажане з'єднання обмотки статора зіркою.

Визначивши діапазон зміни струму статора при досвіді к. з., досвід починають із граничного значення цього струму, установивши на індукційному регуляторі відповідна напруга к. з. U_k . Потім поступово знижують ця напруга до значення, при якому струм I_k досягне нижньої межі встановленого діапазону його значень. При цьому знімають показання приладів для 5—7 крапок, одна й з яких повинна відповідати номінальному струму статора ($I_k = I_{\text{ном}}$). Тривалість досвіду повинна бути мінімально можливою. Із цією метою вимірюють лише одну лінійну напругу (наприклад, $U_{\text{кАВ}}$), тому що деяка несиметрія лінійних напруг при досвіді к. з. не має значення. Лінійні струми вимірюють хоча б у двох лінійних проводах (наприклад, $I_{\text{кА}}$ й $I_{\text{кВ}}$). За розрахункове значення струму к. з. приймають середнє арифметичне цих двох значень. Після зняття останніх показань приладів двигун варто відключити й відразу ж зробити вимір активного опору фази обмотки статора r'_1 , щоб визначити температуру обмотки. Лінійні напруги й струми перераховують на фазні U_k й I_k по формулах, аналогічним (14.3) і (14.4).

Ватметр W вимірює активну потужність к. з. P_k За отриманим значенням напруг U_k , струмів I_k і потужностей P_k обчислюють наступні параметри:

коефіцієнт потужності при к.з.

$$\cos \varphi_{\text{до}} = P_k / (m_l U_k I_k); \quad (14.9)$$

повний опір к.з. (Ом)

$$z_k = U_k / I_k; \quad (14.10)$$

активного й індуктивного складового цього опору (Ом)

$$r_k = z_k \cos \varphi_{\text{до}}; \quad (14.11)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (14.12)$$

Обмірювані й обчислені величини заносять у таблицю, а потім будують характеристики к. з.: I_k ; P_k й $\cos \varphi_{\text{до}} = f(U_k)$ (мал. 14.3).

При досвіді к. з. обмотки двигуна швидко нагріваються до робочої температури, тому що при нерухомому роторі двигун не вентилюється. Температуру ($^{\circ}\text{З}$) обмотки Θ_1 , звичайно визначають по опорі фази r'_2 , обмірюваному безпосередньо после проведення досвіду, по формулі

$$\Theta_1 = [(r'_1 - r_{1.20})(255/r_{1.20})] + 20, \quad (14.13)$$

де — $r_{1.20}$ опір фази обмотки статора в холодному стані (звичайно при температурі 20°C), Ом.

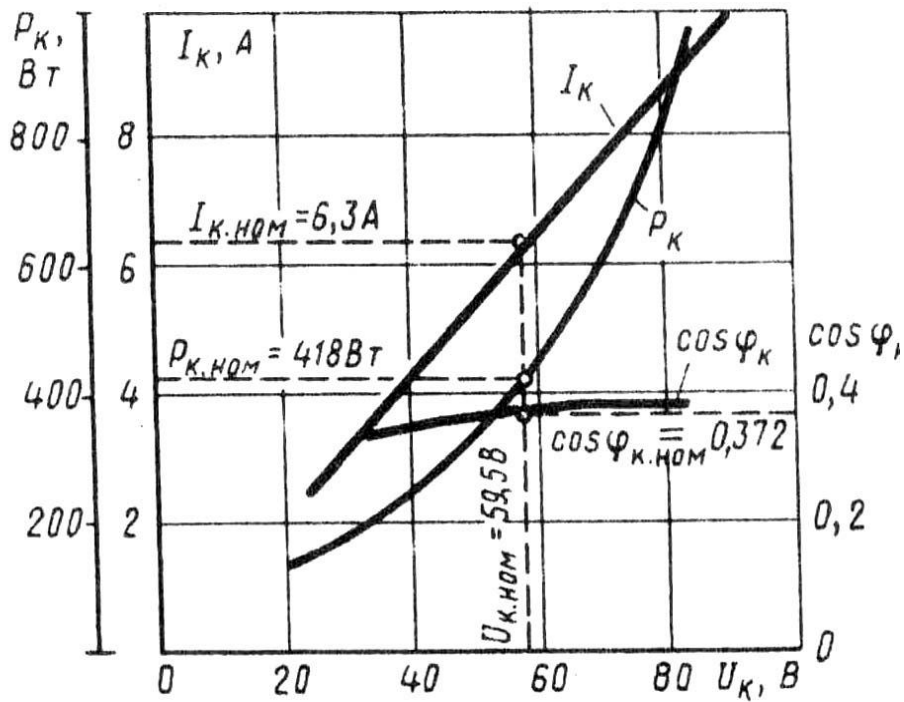


Рис. 14.3. Характеристики к.з. трифазного асинхронного двигуна (3,0 кВт, 220/380В, 1430 об/хв)

Якщо ж температура обмотки виявилася менше розрахункової робочої температури Θ_2 для відповідного класу нагревостойкості ізоляції двигуна (див. § 8.4), той активний опір к. з. r_k (Ом) перераховують на робочу температуру:

$$r_k = r'_{до} [1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)] \quad (14.14)$$

де r_k' - активний опір к. з. при температурі Θ_1 отличающейся від розрахункової робочої; $\alpha = 0,004$.

Потім перераховують на робочу температуру повний опір к. з. $Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$, напруга к. з. $U_k = I_k Z_k$ і потужність к. з. $P_k = m_1 I_k^2 r_k$.

На характеристиках к. з. (мал. 14.3) відзначають значення величин $P_{к. ном}$, $U_{к. ном}$, що відповідають току к. з. $I_k = I_{1 ном}$.

Струм і потужність к. з. перераховують на номінальну напругу $U_{1 ном}$:

$$I'_{до} = I_n \approx I_{1 ном} (U_{1 ном} / U_{к. ном}); \quad (14.15)$$

$$P'_{до} \approx P_{к. ном} (U_{1 ном} / U_{к. ном})^2 \quad (14.16)$$

Варто мати на увазі, що таке перерахування є наближеним, тому що при $U_k = U_{1 ном}$ настає магнітне насичення сердечників (особливо зубцових шарів) статора й ротора; це приводить до зменшення індуктивного опору x_k , що не враховується формулами (14.15) і (14.16). Кратність пускового струму дорівнює $I_{п} / I_{1 ном}$.

Електромагнітна потужність у режимі к. з., передана на ротор двигуна, дорівнює електричним втратам в обмотці ротора $P_{э2 до}$, тому електромагнітний момент при досвіді к. з. (Нм)

$$M_k \approx M_n = P_{э2 до} / \omega_1 = (P_{к. ном} - P_{э1 до} - P_{м. к}) / \omega_1,$$

де $P_{э1 до} = m_1 I_{к. ном}^2 r_1$ — електричні втрати в обмотці статора при досвіді к. з.

Магнітні втрати при досвіді к. з. Рм. до приблизно визначають по характеристиках х.х. (див. мал. 14.2) при напрузі $U_1 = U_K$. У режимі х.х. магнітний потік Φ більше, ніж у режимі к. з., але якщо в режимі х.х. магнітні втрати відбуваються тільки в сердечнику статора (див. § 13.1), то в режимі к. з. ($s = 1$) магнітні втрати відбуваються ще й у сердечнику ротора, тому що $f_2 = f_1$.

Початковий пусковий момент одержують перерахуванням моменту M_K на початковий пусковий струм I_{Π} :

$$M_n \approx M_K (I_{\Pi} / I_K)^2.$$

Потім визначають кратність пускового моменту $M_{\Pi} / M_{\text{ном}}$.

Самостійна робота №13

Тема: Аналітичний метод розрахунків робочих характеристик АД.

Мета: вивчити принцип розрахунку робочих характеристик АД аналітичним методом.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Аналітичний метод розрахунку робочих характеристик асинхронних двигунів
- 2 Приклад розрахунку

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Які переваги аналітичного метода розрахунків робочих характеристик АД?
- 2 Опишіть послідовність розрахунків при аналітичному методі визначення робочих характеристик АД.

1 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 й неминучу неточність як при побудові, так і при її наступному використанні, пов'язані 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 яких-небудь утруднень. Аналітичний метод розрахунку заснований на схемі заміщення асинхронного двигуна. Вихідними при цьому є паспортні дані двигуна ($P_{\text{НОМ}}$, $U_{1\text{НОМ}}$, $n_{2\text{НОМ}}$) і результати виконання дослідів холостого ходу й короткого замикання.

Розрахунок ведуть у наступному порядку.

Визначають наведений активний опір ротора (Ом):

$$r_2' = r_k - r_1, \quad (14.30)$$

потім критичне ковзання:

$$s_{\text{кр}} \approx r_2' / x_k \quad (14.31)$$

і номінальне ковзання:

$$s_{\text{НОМ}} = (n_1 - n_{2\text{НОМ}}) / n_1 \quad (14.32)$$

Задавшись рядом значень ковзання (усього 6—7 значень, у тому числі номінальне $s_{\text{НОМ}}$ і критичне $s_{\text{кр}}$), визначають необхідні для побудови робочих характеристик величини.

Еквівалентний активний опір (Ом)

$$r_{\text{ЭК}} = r_1 + r_2' / s. \quad (14.33)$$

Еквівалентний повний опір робочого контуру схеми заміщення (Ом)

$$Z_{\text{ЭК}} = \sqrt{r_{\text{ЭК}}^2 + x_k^2} \quad (14.34)$$

Коефіцієнт потужності робочого контуру схеми заміщення

$$\cos \varphi_2 = r_{\text{ЭК}} / Z_{\text{ЭК}}. \quad (14.35)$$

Наведений струм ротора, (А)

$$I_2' = U_1 / Z_{\text{ЭК}} \quad (14.36)$$

і його активна й реактивна складові (А)

$$I_{2a}' = I_2' \cos \varphi_2; \quad (14.37)$$

$$I_{2p}' = I_2' \sin \varphi_2. \quad (14.38)$$

Активні й реактивна складові токи статора (А)

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}'; \quad (14.39)$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I_{2p}' \quad (14.40)$$

Тут $I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0$ — активна складова струму холостого ходу; $I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0$ — реактивна складова цього струму.

Струм в обмотці статора (А)

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} \quad (14.41)$$

Коефіцієнт потужності двигуна

$$\cos \varphi_1 = I_{1a} / I_1 \quad (14.42)$$

Споживана двигуном потужність (Вт)

$$P_1 = m_1 U_1 I_{1a} \quad (14.43)$$

Електричні втрати статора $P_{\Sigma 1}$ визначають по (13.2), електромагнітну потужність P_{em} — по (13.6), електромагнітний момент M — по (13.11), електричні втрати в роторі $P_{\Sigma 2}$ — по (13.5), додаткові втрати $P_{доб}$ — по (13.7) і (13.8).

Корисна потужність двигуна (Вт)

$$P_2 = P_{em} - P_{\Sigma 2} - P_{мех} - P_{доб}, \quad (14.44)$$

де $P_{мех}$ — механічні втрати, Вт; їх визначають із досвіду холостого ходу (див. мал. 14.2).

Коефіцієнт корисної дії двигуна визначають по (13.10), частоту обертання ротора — по (10.2). Корисний момент (момент на валу) двигуна (Н•м)

$$M_2 = 9,55 P_2 / n_2. \quad (14.45)$$

Результати розрахунку зводять у таблицю (див. табл. 14.1), а потім будують робочі характеристики двигуна (див. мал. 13.7).

2 Приклад розрахунку

Трифазний асинхронний двигун має паспортні дані: $P_{ном} = 3,0$ кВт, $U_{ном} = 220/380$ В, $I_{1ном} = 6,3$ А, $n_{ном} = 1430$ про/хв. Активний опір фази обмотки статора при робочій температурі $r_1 = 1,70$ Ом. Характеристики х.х. двигуна наведені на мал. 14.2 ($I_{0ном} = 1,83$ А, $P_{ном} = 300$ Вт, $P'_{0ном} = 283$ Вт, $P_{мех} = 200$ Вт, $\cos \varphi_{0ном} = 0,24$, обмотка статора з'єднана зіркою). Характеристики к. з. наведені на мал. 14.3 ($P_{к. ном} = 418$ Вт, $U_{к. ном} = 59,5$ В, $I_{к. ном} = 6,3$ А, $\cos \varphi_{к. ном} = 0,372$).

Потрібно розрахувати дані й побудувати робочі характеристики двигуна та визначити переважувальну його здатність.

Рішення. Активні й реактивна складові токи х.х.

$$I_{0a} = I_0 \cos \varphi_{0ном} = 1,83 \cdot 0,24 = 0,44 \text{ А,}$$

$$I_{0p} = I_0 \sin \varphi_{0ном} = 1,83 \cdot 0,97 = 1,77 \text{ А.}$$

Повний опір кз. по (14.10)

$$z_k = U_{к. ном} / I_{к. ном} = 59,5 / 6,3 = 9,45 \text{ Ом,}$$

його активна й реактивна складові по (14.11) і (14.12)

$$r_k = z_k \cos \varphi_{к. ном} = 9,45 \cdot 0,372 = 3,5 \text{ Ом,}$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{9,45^2 - 3,5^2} = 8,8 \text{ Ом.}$$

Наведений активний опір ротора по (14.30)

$$r'_2 = r_k - r_1 = 3,5 - 1,7 = 1,8 \text{ Ом.}$$

Критичне ковзання по (14.31)

$$s_{кр} = r'_2 / x_k = 1,8 / 8,8 = 0,20.$$

Номинальне ковзання по (14.32)

$$s_{ном} = (n_1 - n_{2ном}) / n_1 = (1500 - 1430) / 1500 = 0,046.$$

Магнітні втрати по (14.8)

$$P_M = P'_0 - P_{мех} = 283 - 200 = 83 \text{ Вт.}$$

Задаємося наступними значеннями ковзання: 0,01, 0,02, 0,03, 0,046, 0,06 й 0,20. Результати розрахунку наведені в табл. 14.1. Робочі характеристики двигуна представлені на мал. 13.7.

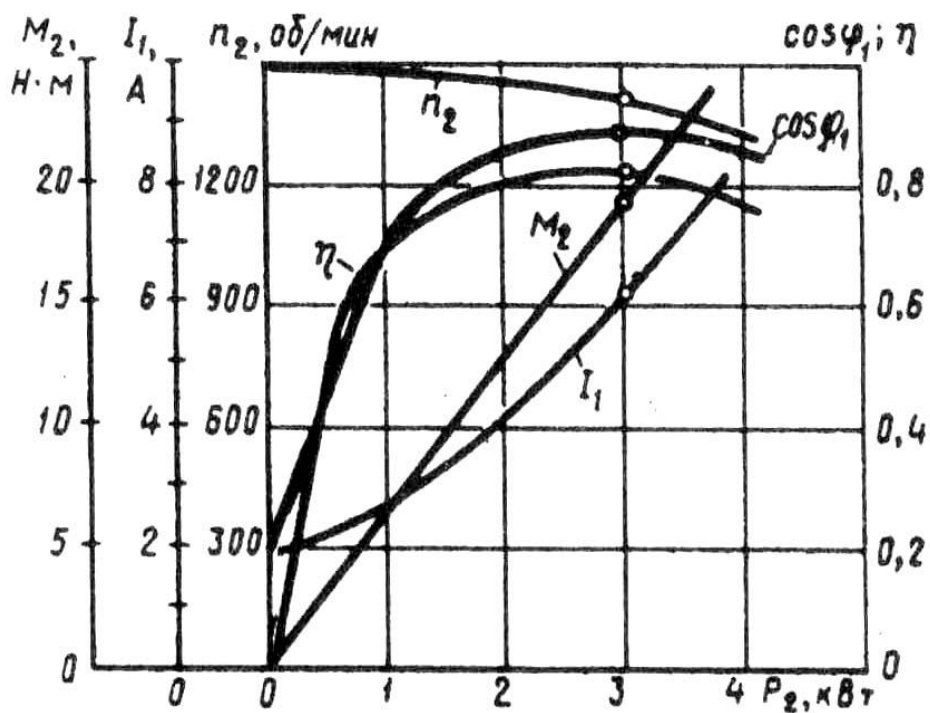


Рис. 13.7. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Таблиця 14.1

Значення параметрів при ковзанні s	0,01	0,02	0,03	0,046	0,06	0,20
$r'_{2/s}$, Ом	180	90	60	39,1	30	10,1
$r_{\text{ЭК}} = r_1 + r'_{2/s}$, Ом	181,7	91,7	61,7	40,8	31,7	11,8
$Z_{\text{ЭК}} = \sqrt{r_{\text{ЭК}}^2 + X_{\text{К}}^2}$, Ом	182	92	62,5	42	33,2	15,5
$\cos \varphi_2 = r_{\text{ЭК}} / Z_{\text{ЭК}}$	0,998	0,996	0,987	0,971	0,955	0,760
$I'_2 = U_1 / Z_{\text{ЭК}}$, А	1,21	2,39	3,52	5,24	6,63	14,20
$I'_{2a} = I'_2 \cos \varphi_2$, А	1,21	2,38	3,47	5,09	6,33	10,7
$I'_{2p} = I'_2 \sin \varphi_2$, А	0,08	0,19	0,57	1,25	1,95	9,20
$I_{1a} = I_{0a} + I'_{2a}$, А	1,65	2,82	3,91	5,54	6,77	11,10
$I_{1p} = I_{0p} + I'_{2p}$, А	1,85	1,96	2,34	3,02	3,72	10,9
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$, А	2,48	3,43	4,55	6,30	7,70	15,5
$\cos \varphi_1 = I_{1a} / I_1$	0,66	0,82	0,86	0,88	0,88	0,71
$P_1 = m_1 U_1 I_{1a}$, Вт	1089	1861	2580	3652	4468	7326
$P_{\text{э1}} = m_1 I_1^2 r_1$, Вт	31,0	60,0	105	200	302	1225
$P_{\text{ем}} = P_1 - P_{\text{э1}} - P_{\text{м}}$, Вт	975	1718	2392	3369	4083	6080
$M = P_{\text{ем}} / \omega_1$, Н•м	6,2	10,9	15,3	21,4	26,0	38,7
$P_{\text{э2}} = s P_{\text{ем}}$, Вт	10	34	72	151	245	—
$\beta^2 = (I_1 / I_{1\text{ном}})^2$	0,15	0,29	0,52	1,0	1,44	—
$P'_{\text{доб}} = \beta^2 P_{\text{доб.ном}}$, Вт	2,7	5,2	9,4	18	26	—
$P_2 = P_{\text{ем}} - P_{\text{э2}} - P_{\text{мех}} - P_{\text{доб}}$, Вт	762	1479	2110	3000	3612	—
$\eta = P_2 / P_1$	0,70	0,79	0,82	0,82	0,81	—
$n_2 = n_1(1-s)$, про/хв	1485	1470	1455	1430	1410	—
$M_2 = 9,55 P_2 / n_2$, Н•м	4,9	9,6	13,8	20,0	24,5	—

Перевантажувальна здатність двигуна $\lambda = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 38,7 / 21,4 = 1,81$.

Самостійна робота №14

Тема: Пуск АД з фазним і короткозамкнутим ротором. АД з короткозамкнутим ротором і покращеними характеристиками.

Мета: ознайомитися з пусковими властивостями АД, з методами пуску то з будовою і принципом дії АД з короткозамкнутим ротором.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Пускові властивості двигунів
- 2 Пуск двигунів з короткозамкненим ротором
- 3 Короткозамкнені асинхронні двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Чим характеризуються пускові властивості АД.
- 2 Як можна покращити пускові властивості АД?
- 3 Поясніть принцип пуску безпосереднім ввімкненням в мережу.
- 4 Поясніть принцип пуску при зниженні напруги.
- 5 Поясніть принцип дії двигуна з глибокими пазами на роторі.
- 6 Поясніть принцип дії двигуна з двома клітками на роторі.

1 Пускові властивості двигунів

Пуск асинхронного двигуна супроводжується перехідним процесом, обумовленим переходом ротора й механічно пов'язаних з ним частин виконавчого механізму зі стану спокою в стан рівномірного обертання, коли обертаючий момент двигуна врівноважується сумою протидіючих моментів, що діють на ротор двигуна.

Пускові властивості двигуна визначаються в першу чергу значенням пускового струму I_n або його кратністю $I_n/I_{ном}$ і значенням пускового моменту M_n або його кратністю $M_n/M_{ном}$. Двигун, що володіє гарними пусковими властивостями, розвиває значний пусковий момент при порівняно невеликому пусковому струмі. Однак одержання такого сполучення пускових параметрів в асинхронному двигуні сполучено з певними труднощами, а іноді виявляється неможливим.

У початковий момент пуску ковзання $s = 1$, тому, зневажаючи струмом х.х., пусковий струм можна визначити з (12.25), підставивши $s = 1$:

$$I_n = U_1 / \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2} . \quad (15.1)$$

Пусковий момент по (13.19)

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

З (15.1) і (13.19) треба, що поліпшити пускові властивості двигуна можна збільшенням активного опору ланцюга ротора r_2' , тому що в цьому випадку зменшення пускового струму супроводжується збільшенням пускового моменту. У той же час напруга U_1 по-різному впливає на пускові параметри двигуна: зі зменшенням U_1 пусковий струм зменшується, що сприятливо впливає на пускові властивості двигуна, але одночасно зменшується пусковий момент. Доцільність застосування того або іншого способу поліпшення пускових властивостей двигуна визначається конкретними умовами експлуатації двигуна й вимогами, які пред'являються до його пускових властивостей.

Крім пускових значень струму I_n і моменту M_n пускові властивості двигунів оцінюються ще й такими показниками: тривалість і плавність пуску, складність пускової операції, її економічність (вартість і надійність пускових апаратів і втрат енергії в ній). Пуск двигунів з фазним ротором. Наявність контактних кілець у двигунів з фазним ротором дозволяє підключити до обмотки ротора пусковий реостат (ПР). При цьому активний опір ланцюга ротора збільшується до значення $R_2 = r_2' + r_d'$, де r_d' — електричний опір пускового реостата, наведене до обмотки статора. Вплив збільшеного значення активного опору на пусковий момент двигуна M_n слідує з (13.19). Це вплив графічно показаний на мал. 15.1, з якого видно, що якщо при відсутності ПР, тобто при активному опорі ланцюга ротора $R_2 = r_2$, пусковий момент $M_n = M_{но}$, те при введенні в ланцюг ротора додаткового активного опору $r_{доб}$, коли $R_2' = r_2' + r_{доб}'$, пусковий момент зростає й при $R_2'' = r_2' + r_{доб}'' = x_1 + x_2'$ досягає найбільшого значення $M_{n,наиб}$. При $R_2' > x_1 + x_2'$ пусковий момент зменшується.

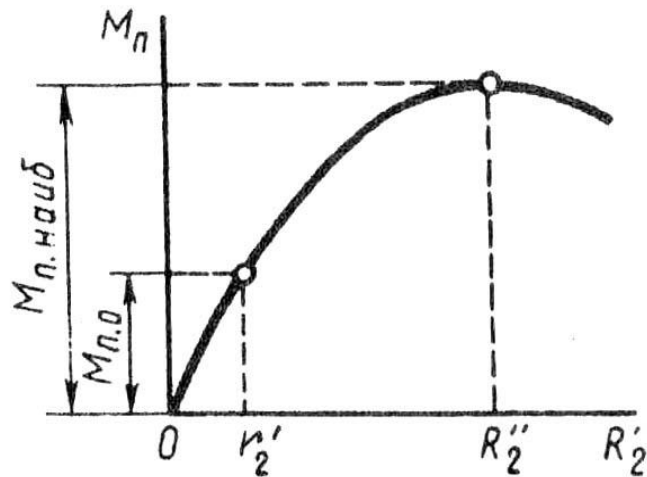


Рис. 15.1. Залежність пускового моменту від активного опору ланцюга ротора

При виборі опору пускового реостата $r_{\text{доб}}$ виходять із умов пуску двигуна: якщо двигун включають при значному навантажувальному моменті на валу, опір пускового реостата $r_{\text{доб}}$ вибирають таким, щоб забезпечити найбільший пусковий момент (див. графік при $r'_{2\text{III}}$ на мал. 13.6); якщо ж двигун включають при невеликому навантажувальному моменті на валу, коли пусковий момент не має вирішального значення для пуску, виявляється доцільним опір ПР $r_{\text{доб}}$ вибрати трохи більше значення, що відповідає найбільшому пусковому моменту, тобто щоб $R'_2 > x_1 + x'_2$. У цьому випадку пусковий момент виявляється трохи меншим найбільшого значення $M_{\text{п.мах}}$, але зате пусковий струм значно зменшується (див. графіка при $r'_{2\text{IV}}$ на мал. 13.6).

На мал. 15.2, а показана схема включення ПР у ланцюг фазного ротора. У процесі пуску двигуна щабля ПР перемикають таким чином, щоб струм ротора залишався приблизно незмінним, а середнє значення пускового моменту було близько до найбільшого. На мал. 15.2, б представлений графік зміни пускового моменту асинхронного двигуна при чотирьох щаблях пускового реостата. Так, у початковий момент пуску (перший щабель реостата) пусковий момент дорівнює $M_{\text{п.мах}}$. У міру розгону двигуна його момент зменшується по кривій 1. Як тільки значення моменту зменшиться до значення $M_{\text{п.мін}}$ важіль реостата переводять на другий щабель й опір реостата зменшується. Тепер залежність $M = f(s)$ виражається кривій 2 і пусковий момент двигуна знову досягає $M_{\text{п.мах}}$. Потім ПР перемикають на третю й на четверту щаблі (криві 3 й 4). Після того як електромагнітний момент двигуна зменшиться до значення, рівного значенню протидіючого моменту на валу двигуна, частота обертання ротора досягне сталого значення й процес пуску двигуна буде закінчений. Таким чином, протягом усього процесу пуску значення пускового моменту залишається приблизно постійним, рівним $M_{\text{п.порівн}}$. Варто мати на увазі, що при занадто швидкому перемиканні щаблів реостата пусковий струм може досягти неприпустимо більших значень.

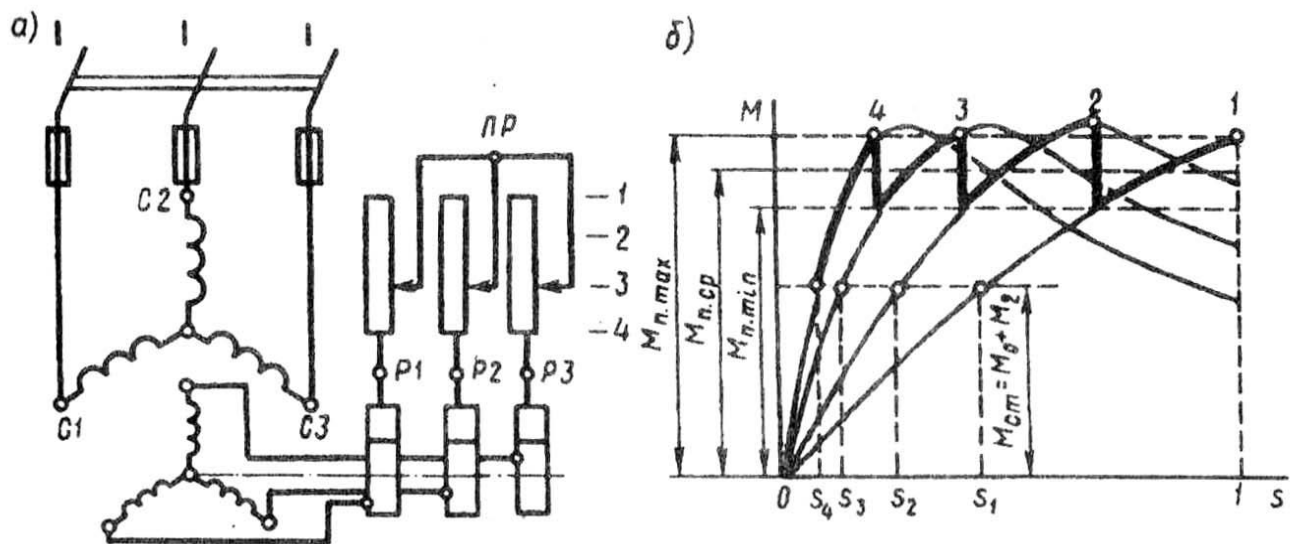


Рис. 15.2. Схема включення пускового реостата (а) і побудова графіка пускового моменту (б) асинхронного двигуна з фазним ротором

Пускові реостати складаються з кожуха, важеля з перемикаючим пристроєм й опорів, виконаних з металевого дроту або стрічки, намотаної у вигляді спирали, або ж із чавунного лиття. Пускові реостати розраховані на короткочасне протікання струму, а тому важіль пускового реостата не можна довго затримувати на проміжних щаблях, тому що опору реостата можуть перегоріти. По закінченні процесу пуску, коли важіль реостата перебуває на останньому щаблі, обмотка ротора замкнута накоротко.

На закінчення відзначимо, що в асинхронних двигунах з фазним ротором забезпечується найбільш сприятливе співвідношення між пусковим моментом і пусковим струмом: великий пусковий момент при невеликому пусковому струмі (в 2—3 рази більше номінального). Недоліками пускових властивостей двигунів з фазним ротором є деяка складність, тривалість і неекономічність пускової операції. Останнє викликається необхідністю застосування в схемі двигуна пускового реостата й непродуктивною витратою електроенергії при його нагріванні.

2 Пуск двигунів з короткозамкненим ротором

Пуск безпосереднім включенням у мережу (мал. 15.3). Цей спосіб пуску, відрізняючись простотою, має істотний недолік: у момент підключення двигуна до мережі в обмотці статора виникає великий пусковий струм, в 5-7 разів перевищуючий номінальний струм двигуна. При невеликій інерційності виконавчого механізму частота обертання двигуна швидко досягає сталого значення й пусковий струм також швидко спадає, не викликаючи перегріву обмотки статора. Але такий значний кидок струму в живильній мережі може викликати в ній помітне спадання напруги. Однак цей спосіб пуску завдяки своїй простоті набув найбільшого застосування для двигунів потужністю до 38-50 квт і більше (при достатньому перетині жив токопідводящего кабелю). При необхідності зменшення пускового струму двигуна застосовують який-небудь зі способів пуску короткозамкнених двигунів при зниженій напрузі.

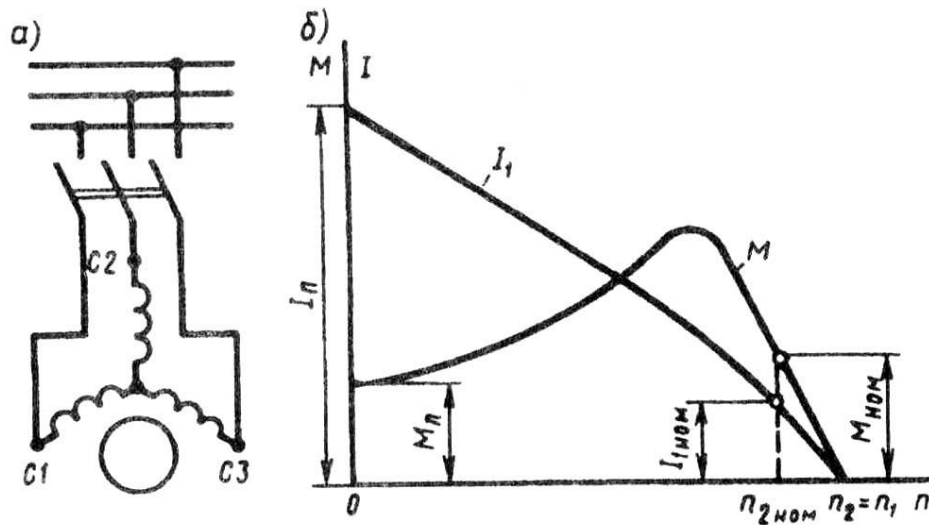


Рис. 15.3. Схема безпосереднього включення в мережу (а) і графіки зміни струму й моменту при пуску (б) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Пуск при зниженій напрузі. Відповідно до (15.1) пусковий струм двигуна пропорційний підведеній напрузі U_1 , зменшення якого викликає відповідне зменшення пускового струму. Існує кілька способів зниження подводимого до двигуна напруги. Розглянемо деякі з них.

Для асинхронних двигунів, що працюють при з'єднанні обмоток статора трикутником, можна застосувати пуск перемиканням обмотки статора із зірки на трикутник (мал. 15.4, а). У момент підключення двигуна до мережі перемикач ставлять у положення «зірка», при якому обмотка статора виявляється з'єднаною в зірку. При цьому фазна напруга на статорі знижується в $\sqrt{3}$ раз. У стільки ж раз зменшується й струм у фазних обмотках двигуна (мал. 15.4, б). Крім того, при з'єднанні обмоток зіркою лінійний струм дорівнює фазному, у той час як при з'єднанні цих же обмоток трикутником лінійний струм більше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Отже, перемкнувши обмотки статора зіркою, ми домагаємося зменшення лінійного струму в $(\sqrt{3})^2 = 3$ рази.

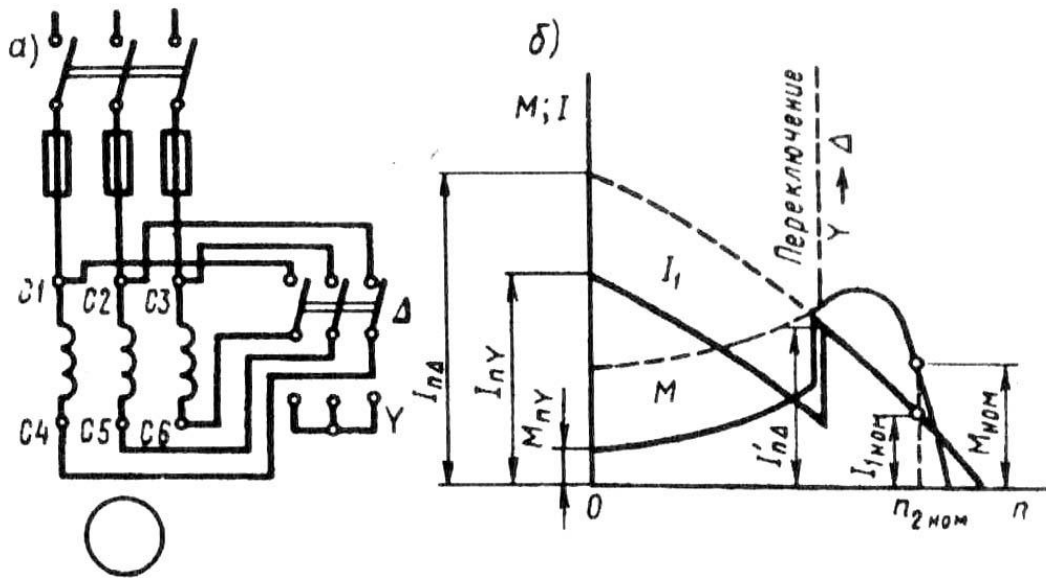


Рис. 15.4. Схема включення (а) і графіки зміни моменту й струму (фазного) при пуску (б) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором перемиканням обмотки статора із зірки на трикутник

Після того як ротор двигуна розженеться до частоти обертання, близької до сталої, перемикач швидко переводять у положення «трикутник» і фазні обмотки двигуна виявляються під номінальною напругою. Виниклий при цьому помітний струм до значення $I'_{пд}$ є незначним.

Розглянутий спосіб пуску має істотний недолік - зменшення фазної напруги в $\sqrt{3}$ раз супроводжується зменшенням пускового моменту в три рази, тому що, згідно (13.19), пусковий момент асинхронного двигуна прямо пропорційний квадрату напруги U_1 . Таке значне зменшення пускового моменту не дозволяє застосовувати цей спосіб пуску для двигунів, що включають у мережу при значному навантаженні на валу.

Описаний спосіб зниження напруги при пуску застосуємо лише для двигунів, що працюють при з'єднанні обмотки статора трикутником. Більше універсальним є спосіб зі зниженням подводимого до двигуна напруги за допомогою реакторів (реактивних котушок — дроселів). Порядок включення двигуна в цьому випадку наступний (мал. 15.5, а). При розімкненому рубильнику 2 включають рубильник 7. При цьому струм з мережі надходить в обмотку статора через реактори Р, на яких відбувається спадання напруги $j I_n^* x_p$ (де x_p — індуктивний опір реактора, Ом). У результаті на обмотку статора подається знижена напруга. Після розгону ротора двигуна включають рубильник 2 і подводимое до обмотки статора напруга виявляється номінальним.

Недолік цього способу пуску полягає в тому, що зменшення напруги в $U'_{1/}$ $U_{1ном}$ раз супроводжується зменшенням пускового моменту $M_{п}$ в $(U'_{1/} U_{1ном})^2$ разів.

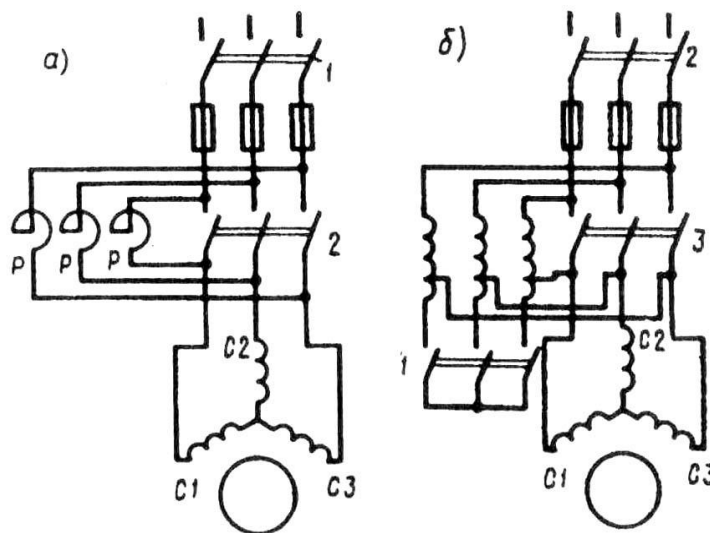


Рис. 15.5. Схеми реакторного (а) і автотрансформаторного (б) способів пуску асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

При пуску двигуна через понижуючий автотрансформатор (мал. 15.5, б) спочатку замикають рубильник 1, що з'єднує обмотки автотрансформатора зіркою, а потім включають рубильник 2 і двигун виявляється підключеним на знижену напругу U'_1 . При цьому пусковий струм двигуна, обмірюваний на виході автотрансформатора, зменшується в K_A раз, де K_A — коефіцієнт трансформації автотрансформатора. Що ж стосується струму в живильній двигун мережі, тобто струму на вході автотрансформатора, то він зменшується в DK_A^2 раз у порівнянні з пусковим струмом при безпосереднім включенні двигуна в мережу. Справа в тому, що в понижуючому автотрансформаторі первинний струм менше вторинного в K_A раз і тому зменшення пускового струму при автотрансформаторному пуску становить $K_A K_A = DK_A^2$ раз. Наприклад, якщо кратність пускового струму асинхронного двигуна при безпосереднім його включенні в мережу становить $I_{п}/I_{ном} = 6$, а напруга мережі 380 В, те при автотрансформаторному пуску зі зниженням напруги до 220 В кратність пускового струму в мережі $I'_{п}/I_{ном} = 6/(380/220)^2 = 2$.

Після первісного розгону ротора двигуна рубильник 1 розмикають й автотрансформатор перетворюється в реактор. При цьому напруга на виводах обмотки статора трохи підвищується, але все-таки залишається менше номінального. Включенням рубильника 3 на двигун подається повна напруга мережі. Таким чином, автотрансформаторний пуск проходить трьома шаблями: на першому шаблі до двигуна підводить напруга $U_1 = (0,50 \div 0,60) U_{ном}$, на другий — $U_1 = (0,70 \div 0,80) U_{ном}$ й, нарешті, на третьому шаблі до двигуна підводить номінальна напруга $U_{ном}$.

Як і попередні способи пуску при зниженій нарузі, автотрансформаторний спосіб пуску супроводжується зменшенням пускового моменту, тому що значення останнього прямо пропорційно квадрату напруги. З погляду зменшення пускового струму автотрансформаторний спосіб пуску краще реакторного, тому що при реакторному пуску пусковий струм у живильній мережі зменшується в $U'_1/U_{ном}$ раз, а при автотрансформаторному - в $(U'_1/U_{ном})^2$ разів. Але деяка складність пускової операції й підвищена вартість пускових апаратів (понижуючий

автотрансформатор і перемикаюча апаратури) трохи обмежують застосування цього способу пуску асинхронних двигунів.

3 Короткозамкнені асинхронні двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками

Прагнення поліпшити пускові властивості асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором привело до створення асинхронних двигунів з особливою конструкцією ротора: двигунів із глибокими пазами на роторі й двигунів із двома короткозамкненими клітками на роторі.

Двигун із глибокими пазами на роторі. Від звичайного асинхронного двигуна цей двигун відрізняється тим, що в нього пази ротора зроблені у вигляді вузьких глибоких щілин, у які покладені стрижні обмотки ротора, що представляють собою вузькі смуги. По обидва боки ці стрижні приварені до замикаючих кілець. Звичайно глибокий паз має співвідношення розмірів $h_{\text{п}}/b_{\text{п}} = 9 \div 10$, де $h_{\text{п}}$, $b_{\text{п}}$ — висота й ширина паза.

У момент включення двигуна, коли частота струму в роторі має найбільше значення ($f_2 = f_1$), індуктивний опір нижньої частини кожного стрижня значно більше верхньої. Порозумівається це тим, що нижня частина стрижня зчеплена з більшим числом магнітних силових ліній поля розсіювання (мал. 15.6, а). На мал. 15.6, б показаний графік розподілу щільності пускового струму в стрижні ротора із глибокими пазами по висоті стрижня. Із цього графіка треба, що майже весь струм ротора проходить по верхній частині стрижня, поперечний переріз якої набагато менше перетину всього стрижня. Це рівноцінно збільшенню активного опору стрижня ротора, що, як відомо, сприяє росту пускового моменту двигуна й деякому обмеженню пускового струму (див. § 15.2).

Таким чином, двигун із глибокими пазами на роторі має сприятливе співвідношення пускових параметрів: більшим пусковим моментом при порівняно невеликому пусковому струмі. У міру наростання частоти обертання ротора частота струму в роторі убуває ($f_2 = sf_1$). У зв'язку із цим зменшується індуктивний опір обмотки ротора $x_2 \equiv f_2$. Розподіл щільності струму по висоті стрижня в тому випадку стає більше 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 й двигун працює, як звичайний короткозамкнений.

Ефект витиснення струму добре проявляється при пазах ротора пляшкової форми (мал. 15.7). У цьому випадку «витиснення» струму відбувається у верхню частину паза, що має менший перетин, а отже, більше активний опір. Застосування пазів пляшкової форми дозволяє скоротити висоту пазів ротора, а отже, зменшити діаметр ротора в порівнянні із глибокопазним ротором.

Двигун із двома клітками на роторі. Ще кращими пусковими властивостями володіють асинхронні двигуни із двома короткозамкненими клітками на роторі (мал. 15.8, а): робочою кліткою 1, стрижні якої розташовані в нижньому шарі, і пусковою кліткою 2, стрижні якої розташовані у верхньому шарі, ближче до повітряного зазору.

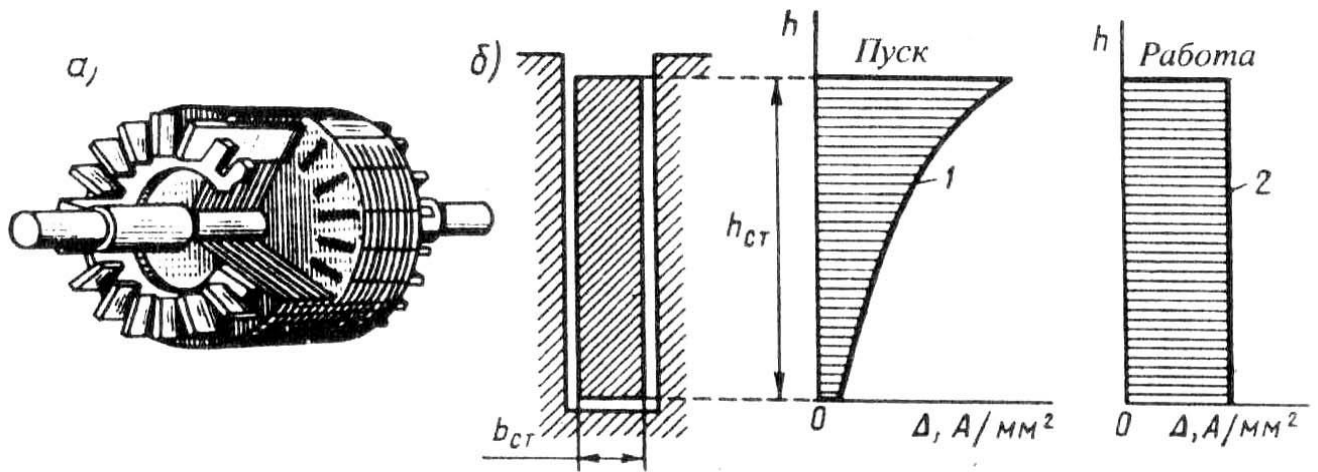


Рис 15.6 Ротор із глибокими пазами: а - пристрій, б - розподіл щільності струму ротора по висоті стрижня при пуску й при роботі двигуна

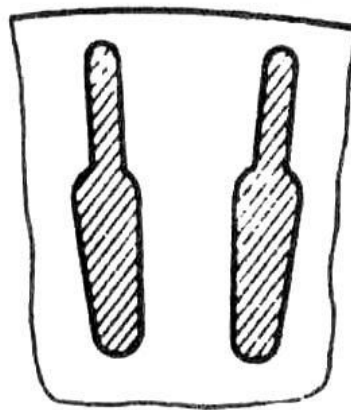


Рис 15.7. Пляшкова форма стрижнів ротора

Стрижні пускової клітки звичайно виконують із латуні або бронзи — матеріалів, що володіють більше високим, чим у міді, активним опором. Індуктивний опір розсіювання пускової клітки невелико, тому що її стрижні розташовані поблизу повітряного зазору й до того ж із двох сторін мають повітряні щілини (мал. 15.8, б). Стрижні робочої клітки виконують із міді, і в порівнянні зі стрижнями пускової клітки вони мають більший перетин. Це забезпечує робочій клітці малий активний опір. Але зате індуктивний опір робочої клітки більше, ніж у пусковий, особливо в початковий період пуску, коли частота струму в роторі порівняно велика ($f_2 \approx f_1$).

У момент пуску двигуна струм ротора проходить в основному по верхній (пусковий) клітці, що володіє малим індуктивним опором. При цьому щільність струму в стрижнях пускової клітки набагато більше щільності струму в стрижнях робочої клітки (мал. 15.8, б). Підвищений активний опір цієї клітки забезпечує двигуну значний: пусковий момент при зниженому пусковому струмі. У міру збільшення частоти обертання ротора зменшується частота струму в роторі, при

цьому індуктивне опір робочої клітки зменшується, і розподіл щільності струму в стрижнях пускової й робочої кліток стає майже однаковим.

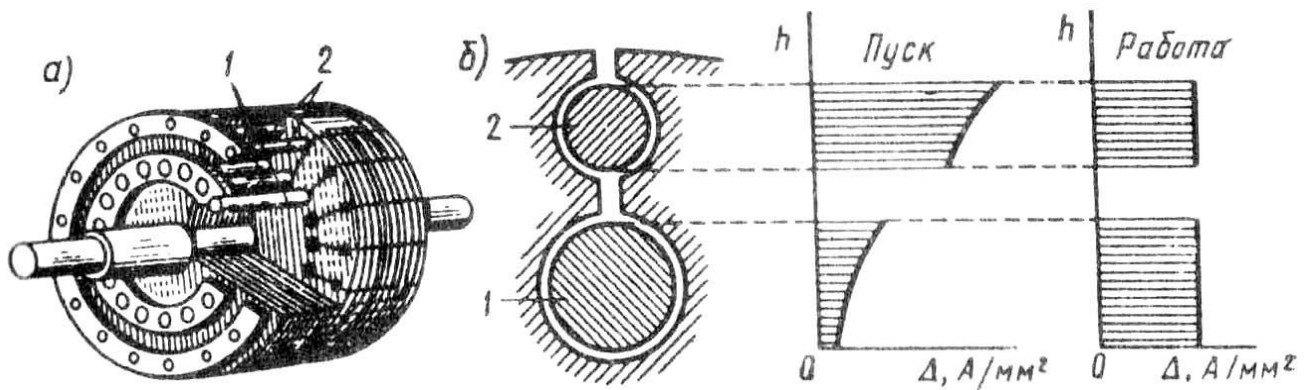


Рис. 15.8 Двухклеточный ротор: а - пристрій; б - розподіл щільності струму в робочій і пусковій клітках при пуску й роботі двигуна

У підсумку відбувається перерозподіл обертаючого моменту між клітками: якщо в початковий період пуску момент створюється головним чином струмами пускової клітки, то по закінченні періоду пуску обертаючий момент створюється в основному струмами робочої клітки. Тому що активні опори кліток ротора неоднакові, то залежність $M = f(s)$ цих кліток зображується різними кривими (мал. 15.9). Максимальне значення моменту пускової клітки внаслідок її підвищеного активного опору зміщено у бік ковзань, близьких до одиниці. Обертаючі моменти від обох кліток спрямовані в одну сторону, тому результуючий момент двигуна дорівнює сумі моментів пусковий $M_{пк}$ і робочої $M_{раб.до}$ кліток $M = M_{п. до} + M_{раб.к}$.

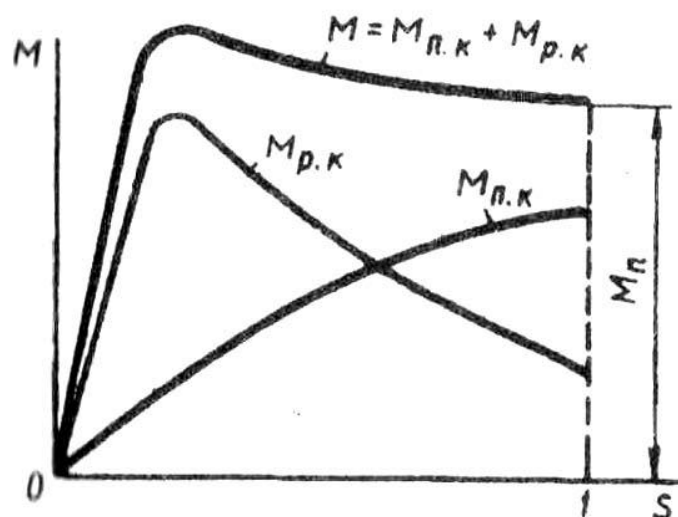


Рис. 15.9. Механічна характеристика двухклеточного асинхронного двигуна

Двигуни із двома клітками на роторі в порівнянні з асинхронними двигунами звичайної конструкції мають підвищену вартість, що пояснюється складністю конструкції.

Самостійна робота №15

Тема: Асинхронний конденсаторний двигун. Робота трифазного АД від однофазної мережі.

Мета: ознайомитися з принципом дії асинхронного конденсаторного двигуна та з принципом роботи трифазного АД від однофазної мережі.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Асинхронні конденсаторні двигуни
- 2 Робота трифазного асинхронного двигуна від однофазної мережі

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Опишіть будову асинхронного конденсаторного двигуна.
- 2 Чим відрізняється асинхронний конденсаторний двигун від однофазного АД?
- 3 За допомогою чого в асинхронному конденсаторному двигуні забезпечується кругове обертове поле?
- 4 Яким чином в асинхронному конденсаторному двигуні можна підвищити пусковий момент?
- 5 За якими параметрами обирають асинхронний конденсаторний двигун?
- 6 Зарисуйте схему ввімкнення двофазного двигуна в трифазну мережу.
- 7 Поясніть принцип роботи трифазного АД від однофазної мережі.

1 Асинхронні конденсаторні двигуни

Асинхронний конденсаторний двигун має на статорі дві обмотки, що займають однакове число пазів і зміщені в просторі відносно одна одної на 90 ел.град. Одну з обмоток — головну — включають безпосередньо в однофазну мережу, а іншу — допоміжну — включають у цю ж мережу, але через робочий конденсатор $C_{раб}$ (мал. 16.7, а).

На відміну від розглянутого раніше однофазного асинхронного двигуна в конденсаторному двигуні допоміжна обмотка після пуску не відключається й залишається включеною протягом усього періоду роботи, при цьому ємність $C_{раб}$ створює фазове зрушення між струмами I_A й I_B .

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

Необхідна для одержання кругового обертового поля ємність (мкФ)

$$C_{раб} = 1,6 \cdot 10^5 I_A \sin \varphi_A / (f_1 U_A k^2), \quad (16.4)$$

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

$$U_A / U_B = \operatorname{tg} \varphi_A \neq 1.$$

Тут φ_A - кут зрушення фаз між струмом I_A і напругою U_A при круговому полі; $k = \omega_B k / (\omega A k)$ - коефіцієнт трансформації, що представляє собою відношення ефективних чисел витків допоміжної й головної обмоток; k й k — обмотувальні коефіцієнти обмоток статора.

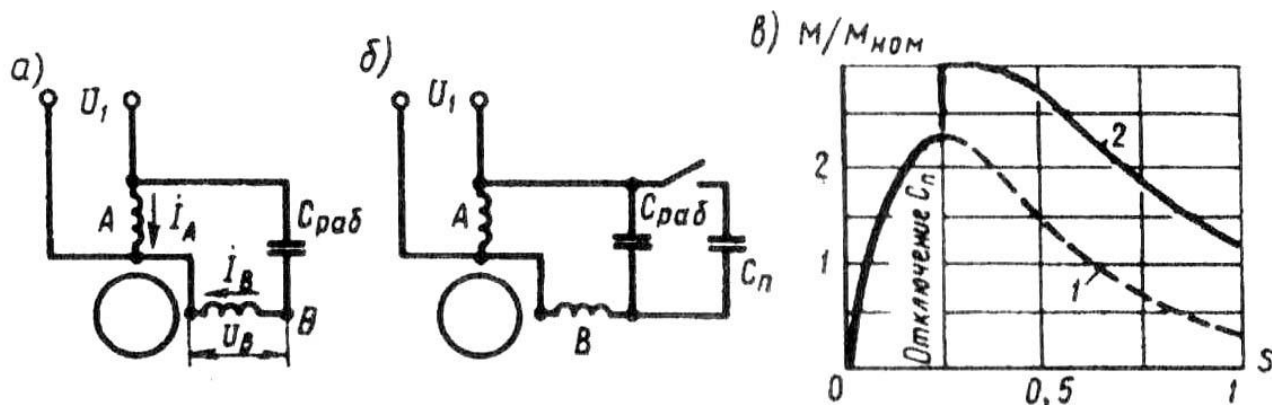


Рис. 16.7. Конденсаторний двигун:

а — з робочою ємністю, б — з робочою й пусковою ємностями, в — механічні характеристики; 1 — при робочій ємності, 2 — при робочій і пусковій ємностях

Аналіз (16.4) показує, що при заданих коефіцієнті трансформації k і відношенні напруг U_A / U_B ємність $C_{раб}$ забезпечує одержання кругового обертового поля лише при одному, цілком певному режимі роботи двигуна. Якщо ж і зміниться режим (навантаження), то зміняться й струм I_A і фазовий кут φ_A , а отже, і $C_{раб}$, що відповідає круговому полю. Таким чином, якщо навантаження двигуна

відрізняється від розрахункової, те обертове поле двигуна стають еліптичним і робочі властивості двигуна погіршуються. Звичайно розрахунок $C_{\text{раб}}$ ведуть для номінального навантаження або близької до неї.

Маючи порівняно високими КПД і коефіцієнт потужності ($\cos \varphi_1 = 0,80 \div 0,95$), конденсаторні двигуни мають незадовільні пускові властивості, тому що ємність $C_{\text{раб}}$ забезпечує кругове поле лише при розрахунковому навантаженні, а при пуску двигуна поле статора еліптичне. При цьому пусковий момент звичайно не перевищує $0,5M_{\text{ном}}$.

Для підвищення пускового моменту паралельно ємності $C_{\text{раб}}$ включають ємність $C_{\text{пуск}}$, названу пусковий (мал. 16.7, б). Величину $C_{\text{пуск}}$ вибирають, виходячи з умови одержання кругового поля статора при пуску двигуна, тобто одержання найбільшого пускового моменту. По закінченні пуску ємність $C_{\text{пуск}}$ варто відключати, тому що при невеликих ковзаннях у ланцюзі обмотки статора, що містить ємність C і індуктивність L , можливий резонанс напруг, через що напруга на обмотці й на конденсаторі може у два-три разів перевищити напругу мережі.

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

$$U_c = U_1 \sqrt{1+k^2} \quad (16.5)$$

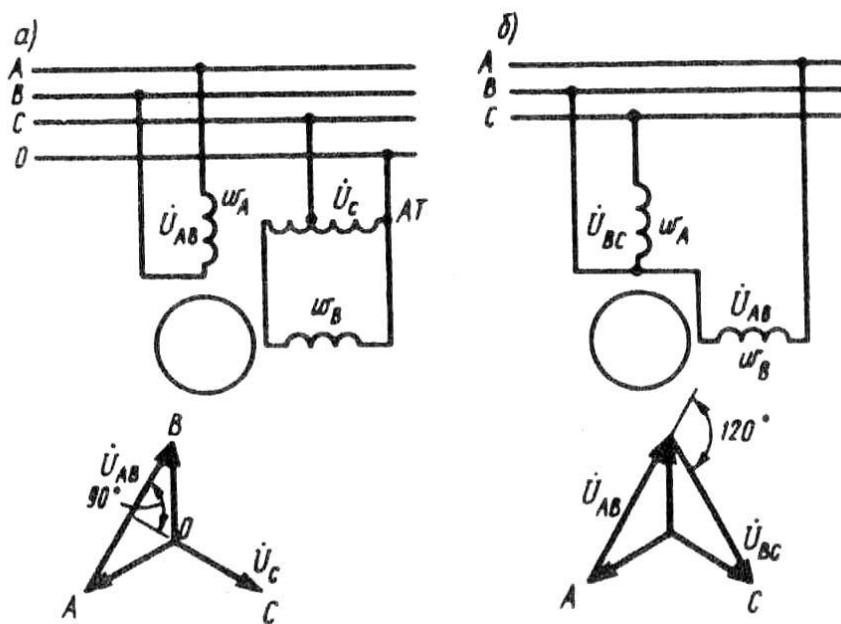


Рис 16.8. Схеми включення двофазного двигуна в трифазну мережу

Конденсаторні двигуни іноді називають двофазними, тому що обмотка статора цього двигуна містить дві фази. Двофазні двигуни можуть працювати й без конденсатора або іншого ФЭ, якщо до фаз обмотки статора підвести двофазну систему напруг (дві напруги, однакові за значенням і частотою, але зрушені по фазі відносно один одного на 90°). Для одержання двофазної системи напруг можна скористатися трифазною лінією з нульовим провідником, включивши обмотки

статора так, як показано на мал. 16.8, а: одну обмотку — на лінійну напругу U_{AB} , а іншу — на фазну напругу U_c через автотрансформатор АТ (для вирівнювання значення напруг на фазних обмотках двигуна). Можливе включення двигуна й без нульового проведення (мал. 16.8, б), але в цьому випадку напруги на обмотках двигуна будуть зрушені по фазі на 120° , що приведе до деякого погіршення робочих властивостей двигуна.

2 Робота трифазного асинхронного двигуна від однофазної мережі

Трифазний асинхронний двигун може бути використаний для роботи від однофазної мережі. У цьому випадку такий двигун включають як конденсаторний по одній зі схем мал. 16.9.

Значення робочої ємності $C_{раб}$ (мкф) при частоті змінного струму 50 Гц можна орієнтовно визначити по одній з формул: для схеми, зображеної на мал. 16.9 а,

$$C_{раб} \approx 2700 I_1 / U_c; \quad (16.6)$$

на мал. 16.9, б

$$C_{раб} \approx 2800 I_1 / U_c; \quad (16.7)$$

на мал. 16.9, в

$$C_{раб} \approx 4800 I_1 / U_c; \quad (16.8)$$

Тут I_1 — номінальний (фазний) струм в обмотці статора, А; U_c — напруга однофазної мережі, В.

При підборі робочої ємності необхідно стежити за тим, щоб струм у фазних обмотках статора при сталому режимі роботи не перевищував номінального значення.

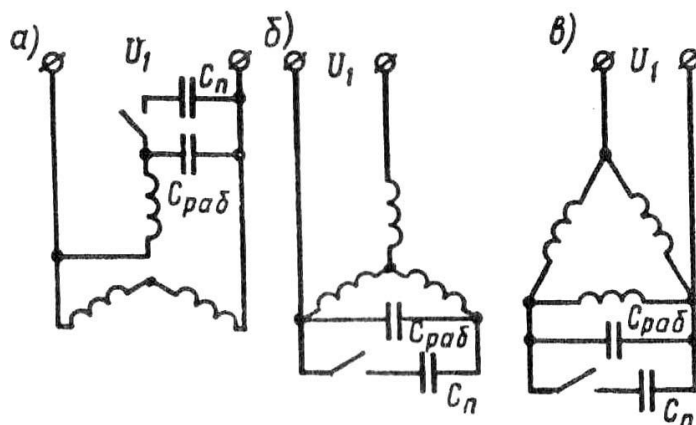


Рис 16.9. Схеми з'єднання обмотки статора трифазного асинхронного двигуна при включенні його в однофазну мережу

Якщо пуск двигуна відбувається при значному навантаженні на валу, то паралельно робочої ємності $C_{раб}$ варто включити пускову ємність

$$C_n = (2,5 \div 3,0) C_{раб}. \quad (16.9)$$

У цьому випадку пусковий момент стає рівним номінальному. При необхідності подальшого збільшення пускового моменту варто прийняти ще більше значення пускової ємності ($C_n \leq 8C_{раб}$).

Велике значення для надійної роботи асинхронного двигуна в якості конденсаторного має правильний вибір конденсатора по напрузі. Варто мати на

увазі, що габарити й вартість конденсаторів визначаються не тільки їхньою ємністю, але й робітником напругою. Тому вибір конденсатора з більшим “запасом” по напрузі веде до невиправданого збільшення габаритів і вартості установки, а включення конденсаторів на напругу, що перевищує припустима робоча напруга, приводить до передчасного виходу з ладу конденсаторів, а отже, і всієї установки.

При визначенні напруги на конденсаторі при включенні двигуна по одній з розглянутих схем необхідно мати у виді наступне: при включенні двигуна за схемою мал. 16.9, а напруга на конденсаторі дорівнює $U_K \approx 1,3 U_C$, а при включенні двигуна по схемах мал. 16.9, б и в ця напруга дорівнює $U_K \approx 1,15 U_C$.

У схемах конденсаторних двигунів звичайно застосовують паперові конденсатори в металевому герметичному корпусі прямокутної форми типів КБГ - МН або БГТ (термостійкі). На корпусі конденсатора зазначені ємність і робоча напруга постійного струму. При включенні такого конденсатора в мережу змінного струму варто зменшити приблизно у два рази припустима робоча напруга. Наприклад, якщо на конденсаторі зазначена напруга 600 В, та робоча напруга змінного струму варто вважати 300 В.

Приклад 16.1. Визначити значення робочої ємності $C_{\text{раб}}$, необхідної для роботи трифазного асинхронного двигуна типу АВ052-4 від однофазної мережі напругою $U_C = 220$ В. Номінальні дані двигуна: $P_{\text{ном}} = 80$ Вт, напруга 220/380 В, струм мережі $I_{1\text{ном}} = 0,56/0,32$ А.

Рішення. Напруга мережі 220 В відповідає з'єднанню обмотки статора в трикутник, тому приймаємо схему включення двигуна в однофазну мережу по мал. 16.9, в. Номінальний (фазний) струм статора $I_1 = 0,32$ А.

Робоча ємність по (16.8) $C_{\text{раб}} = 4800 \cdot 0,32/220 = 6,98$ мкФ. При цьому робоча напруга конденсатора $U_K \approx 1,15 \cdot 220 = 250$ В. Приймаємо в якості $C_{\text{раб}}$ батарею із двох паралельно з'єднаних конденсаторів типу КБГ-МН ємністю по 4 мкФ кожний (ємність батареї 8 мкф) на робочу напругу 600 В.

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

Самостійна робота №16

Тема: Індукційний регулятор напруги і фазорегулятор.

Мета: ознайомитися з будовою та призначенням індукційного регулятора напруги і фазорегулятора.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Індукційний регулятор напруги
- 2 Фазорегулятор

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Дайте визначення поняття індукційного регулятора напруги.
- 2 В чому полягає особливість будови індукційного регулятора напруги?
- 3 В яких випадках застосовують індукційний регулятор напруги?
- 4 Для чого призначений фазорегулятор?

1 Індукційний регулятор напруги (ИР)

Індукційний регулятор напруги (ИР) представляє собою асинхронну машину з фазним ротором, призначену для плавного регулювання напруги. Розглянемо роботу трифазного ИР, що отримали переважне застосування. Ротор ИР загальмований за допомогою черв'ячної передачі, що не тільки втримує його в заданому положенні, але й дозволяє плавно повертати його щодо статора. Обмотки статора й ротора в ИР мають автотрансформаторний зв'язок (мал. 17.1, а), тому ИР іноді називають поворотним автотрансформатором.

Напруга мережі U_1 підводить до обмотки ротора, при цьому ротор створює обертове магнітне поле, що наводить в обмотці ротора ЕРС $E_1^* = -U_1^*$, а в обмотці статора — ЕРС E_2^* (мал. 17.2, а).

Фазове зрушення цих ЕДС відносно один одного залежить від взаємного просторового положення осей обмоток статора й ротора, обумовленого кутом α . При $\alpha = 0$ осі обмоток збігаються, що обертається поле одночасно зчіплюється з обома обмотками й ЕДС E_1^* і E_2^* збігаються по фазі (при цьому E_2^* й U_1^* перебувають у протифазі). При $\alpha = 180$ ел. град ЕДС E_1^* і E_2^* виявляться в протифазі (E_2^* і U_1^* збігаються по фазі). Якщо зневажити внутрішніми спаданнями напруги, то напруга на виході ИР визначається геометричною сумою:

$$U_2^* = U_1^* + E_2^* \quad (17.1)$$

При повороті ротора кінці векторів E_2^* й U_2^* описують окружність (мал. 17.2, б), при цьому U_2^* змінюється від $U_{2\min}^* = U_1^* - E_2^*$ при $\alpha = 0$ до $U_{2\max}^* = U_1^* + E_2^*$ при $\alpha = 180$ ел. град (мал. 17.2, в). Поворот ротора здійснюється або вручну штурвалом, або дистанційно включенням виконавчого двигуна. ИР застосовуються у всіх випадках, де необхідне плавне регулювання напруги, наприклад у лабораторних дослідженнях.

2 Фазорегулятор

Фазорегулятор (ФР) призначений для зміни фази вторинної напруги щодо первинного при незмінній вторинній напрузі. На відміну від ИР обмотки ротора й статора ФР електрически не з'єднані один з одним, тобто мають трансформаторний зв'язок (див. мал. 17.1, б), тому ФР іноді називають поворотним трансформатором.

Зміна фази вторинної напруги здійснюється поворотом ротора щодо статора. Первинною обмоткою у ФР звичайно є обмотка статора. Фазорегулятори застосовуються в пристроях автоматики (для фазового керування) і вимірювальній техніці (для перевірки ваттметрів і лічильників).

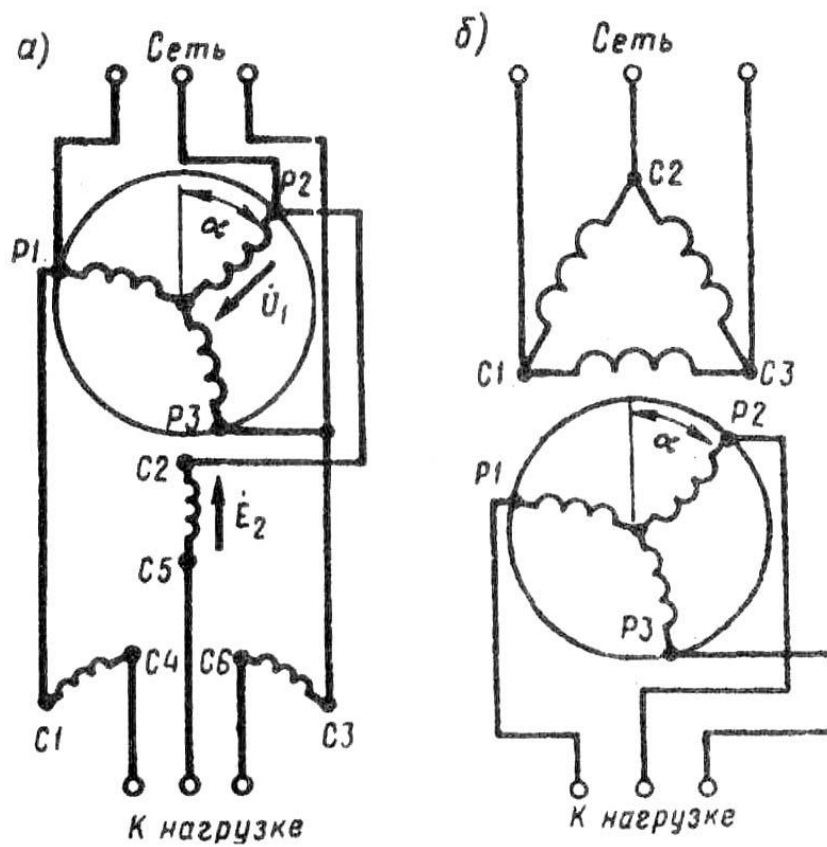


Рис. 17.1. Схеми з'єднання індукційного регулятора напруги (а) і фазорегулятора (б)

Самостійна робота №17

Тема: Асинхронні виконавчі двигуни і лінійні АД.

Мета: вивчити принцип дії та будову асинхронних виконавчих та лінійних двигунів.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Асинхронні виконавчі двигуни. Загальні поняття
- 2 Будова та принцип дії асинхронних виконавчих двигунів
- 3 Лінійні асинхронні двигуни

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Де застосовуються асинхронні виконавчі двигуни?
- 2 Які вимоги висуваються до асинхронних виконавчих двигунів?
- 3 Яка будова асинхронних виконавчих двигунів?
- 4 Поясніть принцип дії асинхронних виконавчих двигунів.
- 5 Яким чином усувається самохід в асинхронних виконавчих двигунах?
- 6 Поясніть принцип дії лінійних АД.
- 7 Які переваги та недоліки лінійних АД?

1 Асинхронні виконавчі двигуни. Загальні поняття

У системах керування, регулювання й контролю широко застосовуються керовані електродвигуни невеликої потужності. За допомогою цих двигунів здійснюється перетворення електричного сигналу в механічне переміщення - обертання вала. Такі електродвигуни називають виконавчими (ИД).

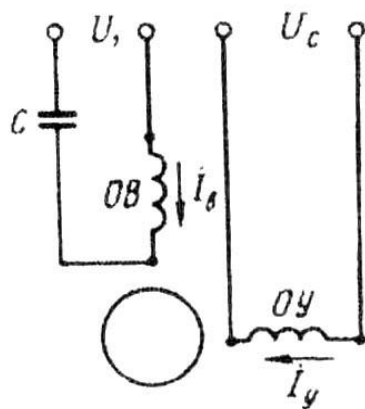


Рис. 17.7. Схема включення асинхронного виконавчого двигуна

Характер вимог, пропонованих до виконавчих двигунів, визначається специфікою їхньої роботи: часті пуски, реверси, що постійно змінюється частота обертання. Основні вимоги - відсутність самоходу, тобто самогальмування при знятті сигналу керування; широкий діапазон регулювання частоти обертання; лінійність характеристик; великий пусковий момент; мала потужність керування; швидкодія (малоинерционность).

2 Будова та принцип дії асинхронних виконавчих двигунів

На статорі асинхронного виконавчого двигуна розташована двофазна обмотка (див. § 16.2). Одна з фазних обмоток — обмотка збудження (ОВ) - постійно включена в мережу з напругою U_1 , а на іншу - обмотку керування (ОУ) — напруга (сигнал керування) U_c подається лише при необхідності включення двигуна (мал. 17.7).

Для роботи двофазного ИД необхідно обертове магнітне поле, неодмінною умовою виникнення якого є наявність просторового й тимчасового зрушень між МДС фазних обмоток статора. Просторове зрушення зазначених МДС забезпечується конструкцією обмотки статора, при до торою осі фазних обмоток зрушені в просторі відносно один одного звичайно на кут 90 ел. град. Тимчасовий (фазний) зрушення МДС створюється або живленням обмотки статора двофазною це темою напруг (див. § 16.2), або включенням у ланцюг ОУ фазообертача - пристрою, що дозволяє одержувати різні фазові зрушення напруги на його виході щодо напруги на вході, тобто щодо напруги на обмотці збудження, або включенням послідовно в ланцюг ОВ ємності (мал. 17.7).

Останній спосіб включення ИД застосовують найбільше часто Звичайно значення ємності Z вибирають із умови одержання кругового поля при пуску двигуна. По закінченні пускового періоду двигун працює з еліптичним обертовим полем.

У процесі керування двигуном змінюють сигнал U_c на ОУ при цьому міняється як значення (амплітуда) МДС цієї обмотки, так й її фазове зрушення

відносно МДС обмотки збудження. Тому розглянутий спосіб керування ИД називають амплітудно-фазовим.

Одна з основних вимог до ИД — відсутність самоходу. Відомо, що звичайні асинхронні двигуни мають невеликий активний опір обмотки ротора й працюють із малим критичним ковзанням (див. § 13.3). Такі двигуни непридатні в якості виконавчих, тому що вони мають самохід, тобто при знятті сигналу керування двигун буде продовжувати працювати як однофазний. Це ілюструє мал. 17.8, а, на якому крапка А визначає режим роботи двигуна з навантажувальним моментом $M_{ном}$ при наявності сигналу керування. При знятті сигналу керування поле статора стає пульсуючим (обмотка возбуждення постійно включена в мережу) і режим роботи двигуна "визначається крапкою В на характеристиці однофазного двигуна. При цьому електромагнітний момент двигуна залишиться позитивним. Якщо ж збільшити активний опір ротора, то форма кривих прямого $M_{пр}$, зворотного $M_{обр}$ і результуючого $M = M_{пр} + M_{обр}$ моментів зміняться (мал. 17.8, б): максимуми моментів $M_{пр}$ і $M_{обр}$ змістяться в область більших ковзань ($s_{кр} > 1$). Тепер після припинення сигналу керування, тобто при переході двигуна в однофазний режим, електромагнітний момент стає негативним M_r (крапка В) і робить на ротор гальмуюча дія, не допускаючи самоходу.

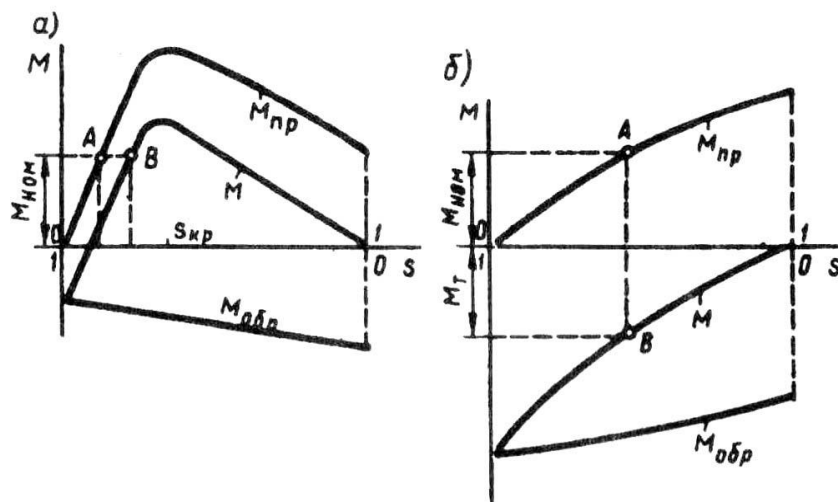


Рис. 17.8. Усунення самоходу в асинхронному виконавчому двигуні

До виконавчих двигунів висуваються також вимоги малоінерційності (швидкодії), тобто при подачі сигналу керування ротор двигуна повинен дуже швидко досягати сталої частоти обертання. Виконанню цієї вимоги сприяють збільшення пускового моменту, зменшення синхронної частоти обертання поля статора й зниження моменту інерції ротора. При підвищених частотах живлячої напруги (більших синхронних частотах обертання) ИД з ротором звичайної (короткозамкненої) конструкції через значний момент інерції останнього не мають необхідну швидкодію. У цьому випадку застосовують асинхронні виконавчі двигуни з порожнім немагнітним ротором (мал. 17.9). Порожній немагнітний ротор являє собою тонкостінну алюмінієву склянку 2, що, з одного боку, забезпечує ротору підвищений активний опір, а з іншого боку - досить невеликий момент інерції.

Двигун має два статори: зовнішній 1 з обмоткою й внутрішній 3 без обмотки, що входить усередину порожньої склянки ротора. Внутрішній статор необхідний для зменшення магнітного сопро тивлення основному магнітному потоку.

У порівнянні з винавчими двигунами звичайно й конструкції двигуни з порожнім немагнітним ротором маю! підвищені габарити й невисокий КПД. Це порозумівається підвищеним зазором між зовнішнім і внутрішнім статорами, що складає ся з товщини стінки склянки ротора й двох повітряних зазо рів. Як відомо, збільшення повітряного зазору сприяємо росту струму, що намагнічує, двигуна й зниженню його КПД.

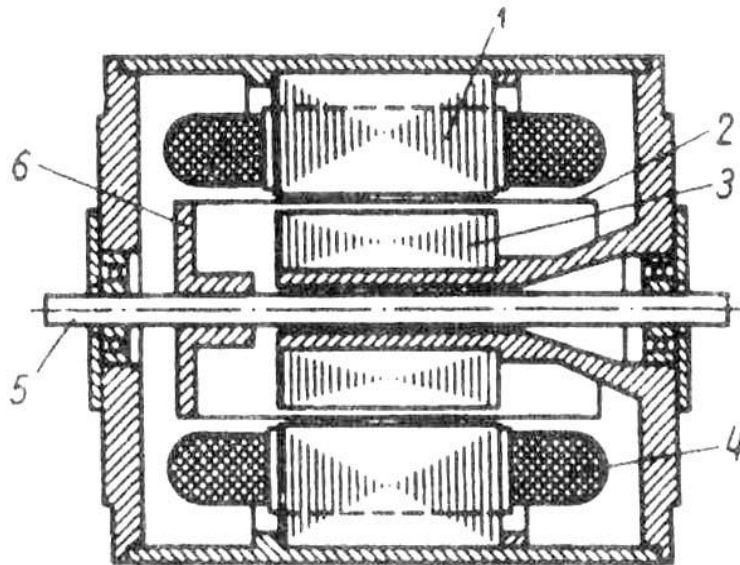


Рис. 17.9. Асинхронний двигун з порожнім немагнітним ротором:
1 - зовнішній статор; 2 - склянка ротора; 3 - внутрішній статор; 4- обмотка статора;
5 - вал; 6 - втулка кріплення склянки ротора

3 Лінійні асинхронні двигуни

Рухлива частина лінійного двигуна робить поступальний рух, тому застосування цих двигунів для привода робочих машин з поступальним рухом робочого органа дозволяє спростити кінематику механізмів, зменшило втрати в передачах і підвищити надійність механізму в цілому.

Можливі лінійні двигуни чотирьох видів: електромагнітні (соленоїдні), магнітоелектричні (із застосуванням постійного магніту), електродинамічні й асинхронних. Асинхронні (індукційні) лінійні двигуни завдяки простоті конструкції й високій надійності набули найбільшого застосування.

Для пояснення принципу роботи лінійного асинхронного двигуна звернемося до асинхронного двигуна з обертовим рухом ротора. Якщо статор цього двигуна (мал. 17.10, а) подумки «розрізати» й «розгорнути» так, щоб він утворив дугу з кутом α (мал. 17.10, б), то діаметр ротора збільшиться. При цьому ми одержимо асинхронний двигун з дуговим статором. Частота обертання (про/хв) магнітне поле статора цього двигуна (синхронна частота)

$$n_1 = n_1^0 \alpha / (2\pi) \quad (17.6)$$

де n_1^0 — синхронна частота обертання звичайного (до «розрізування») асинхронного двигуна, про/хв; α - кут дуги статора, радий.

З (17.6) бачимо, що, змінюючи кут α , можна одержати дуговий асинхронний двигун на будь-яку синхронну частоту менше частоти обертання n_1^0 . Дугові двигуни застосовують для безредукторного привода пристроїв, що вимагають невеликих частот обертання, виключивши застосування складного й трудомісткого редуктора.

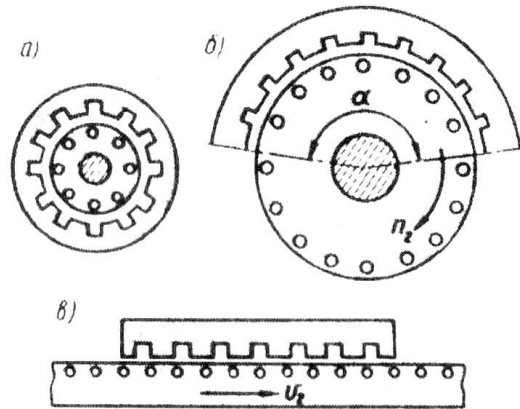


Рис. 17.10. До понять про дуговий і лінійний двигуни

Якщо ж «розрізаний» статор розгорнути в площину, то одержимо асинхронний лінійний двигун (мал. 17.10, в). Принципова конструктивна відмінність лінійного асинхронного двигуна від асинхронного двигуна з обертовим рухом ротора полягає в тому, що первинний елемент лінійного двигуна (індуктор) створює не обертове, а магнітне поле, що біжить, і нижня частина двигуна з короткозамкненою обмоткою (або без її) називана вторинним елементом, переміщається уздовж своєї осі. Швидкість поля, що біжить, у лінійному двигуні (м/с)

$$v_1 = 2\tau f_1 = f_1 L_c / p \quad (17.7)$$

де f_1 — частота струму в обмотці статора, Гц; τ — полюсний розподіл; L_c — довжина статора (індуктора), м.

Принцип дії лінійного асинхронного двигуна заснований на тім, що поле, що біжить, індуктора, зчіплюючись із короткозамкненою обмоткою вторинного елемента двигуна, наводить у ній ЕРС. Виникаючі в стрижнях цієї обмотки струми взаємодіють із полем, що біжить, індуктора й створюють на індукторі й вторинному елементі електромагнітні сили, що прагнуть лінійно перемістити рухливу частину двигуна щодо нерухомої. У деяких конструкціях лінійних двигунів рухливою частиною є індуктор, а в деяких - вторинний елемент, називаний у цьому випадку бігунком. Якщо вторинний елемент лінійного двигуна неможливо виготовити з короткозамкненою обмоткою, то застосовують вторинні елементи у вигляді смуги з міді, алюмінію або феромагнітної сталі. Найбільш задовільними виходять характеристики лінійного двигуна при складеному вторинному елементі, наприклад виконаному у вигляді смуги з феромагнітної сталі, покритої шаром міді.

Основний недолік асинхронних двигунів з розімкнутим статором - дугове й лінійних - явище крайового ефекту, що представляє собою комплекс

електромагнітних процесів, обумовлених розімкнутою конструкцією статора. До небажаних наслідків крайового ефекту в першу чергу варто віднести поява «паразитних» гальмових зусиль, спрямованих проти руху рухливої частини двигуна, і виникнення поперечних сил, що прагнуть змістити рухливу частину двигуна в поперечному напрямку. Крім того, крайовий ефект викликає ряд інших небажаних явищ, що погіршують робочі характеристики лінійних двигунів.

Лінійні асинхронні двигуни застосовують для привода заслінок, стрічкових конвеєрів, транспортних-підйомно-транспортних механізмів. На мал. 17.11 показаний пристрій лінійного асинхронного двигуна привода візка піднімального крана. На візку 3 розташований індуктор лінійного двигуна, що складає із шихтованого сердечника 6, у пазах якого розташована обмотка 5. Напрямна для коліс 2 являє собою сталеву балку 7, до нижньої частини якої прикріплена сталеві смуга 4. магнітне поле, що біжить, індуктора наводить у сталевій смугі 4 вихрові струми. Електромагнітні сили, що виникають у результаті взаємодії цих струмів з магнітним полем індуктора, переміщують індуктор (візок) уздовж сталеві смуги 4.

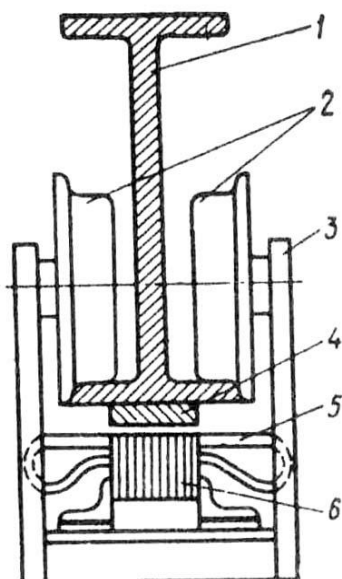


Рис. 17.11. Лінійний асинхронний двигун привода візка піднімального крана

Лінійні асинхронні двигуни значної потужності застосовують на транспорті як тягові двигуни. Один з варіантів такого двигуна показаний на мал. 17.12. Тут індуктор 2 двигуна підвішений до транспортного засобу 1, а сталеві смуга 3 установлена вертикально на підставі шляху між рейками. Із цієї конструкції поперечна сила F_n викликана крайовим ефектом використовується корисно, тому що вона зменшує силу тиску на несучі осі й колеса й, як наслідок, зменшує тертя катання.

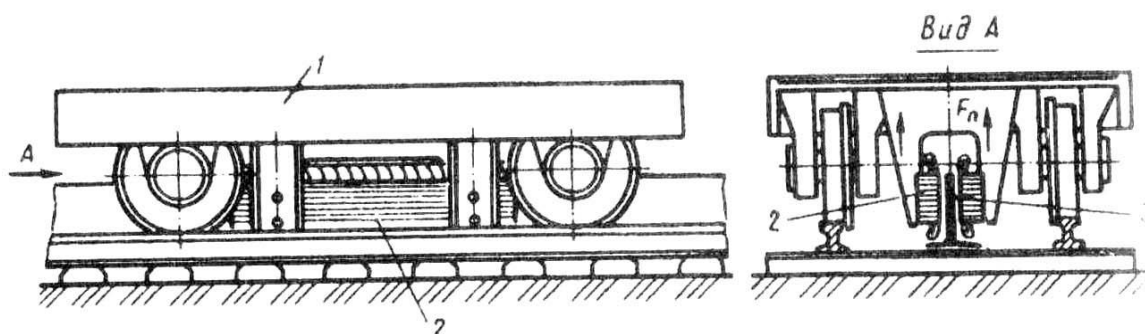


Рис 17.12. Лінійний асинхронний двигун привода залізничного транспортного засобу

Самостійна робота №18

Тема: Охолодження потужних СМ.

Мета: ознайомитися з типами охолодження потужних СМ та з ефективністю водневого охолодження.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Ефективність водневого охолодження

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Який тип охолодження застосовується для потужних СМ?
- 2 Які переваги водневого охолодження?
- 3 В чому полягає ефективність водневого охолодження?
- 4 Як конструктивно забезпечується водневе охолодження?

1 Загальні поняття

У потужних електричних машинах застосовують замкнуту систему охолодження (див. §18.2) з використанням водню як охолодний газ. Особливі властивості водню забезпечують водневому охолодженню ряд переваг:

1. Технічний водень більш ніж у десять разів легше повітря, що сприяє зниженню втрат на вентиляцію, а отже, підвищує КПД машини. Наприклад, у турбогенераторі потужністю 150 тис. квт втрати на вентиляцію при повітряному охолодженні становлять 1000 квт, а при водневому охолодженні турбогенератора такої ж потужності ці втрати становлять усього лише 140 квт, тобто більш ніж у сім разів менше.

2. Завдяки підвищеній теплопровідності водню, що в 6 -7 разів більше, ніж у повітря, він інтенсивніше проохолоджує машину. Це дає можливість при заданих габаритах виготовити машину з водневим охолодженням потужністю на 20 - 25% більше, ніж при повітряному охолодженні.

3. Водневе охолодження знижує небезпека виникнення пожежі в машині тому, що водень не підтримує горіння.

4. Водневе охолодження збільшує термін служби ізоляції обмоток, тому що при явищі корони завдяки відсутності азоту в машині не утворюються нітрати - з'єднання, що роз'їдають органічних складових ізоляційних матеріалів.

2 Ефективність водневого охолодження

Ефективність водневого охолодження підвищується з ростом тиску водню в машині. Але поряд з перерахованими достоїнствами водневе охолодження має й недоліки, сутність яких зводиться до того, що водневе охолодження веде до ускладнення й подорожчання як самої машини, так й її експлуатації. Порозумівається це, у першу чергу, необхідністю змісту цілого комплексу пристроїв водневого господарства, що забезпечує підживлення, очищення й підтримку необхідного тиску водню в системі охолодження машини. Однак у машинах великої одиничної потужності (турбогенераторах, гідрогенераторах, синхронних компенсаторах) водневе охолодження виправдане й дає великий економічний ефект.

Розглянуті способи охолодження машин є непрямими, тому що відбуваються без безпосереднього контакту охолодної речовини з найбільш нагрітими елементами машини - обмотками. Відбір теплоти від обмоток при цих способах охолодження відбувається через електричну ізоляцію (у лобових частинах) і сталь магнітопровода, що знижує ефективність процесу охолодження. Тому більше ефективним є безпосереднє охолодження обмоток й інших елементів машини, що нагрівають. Для здійснення цього способу охолодження в провідниках обмотки й сердечниках роблять внутрішні канали, по яких циркулює охолодна речовина - водень, вода, масло. Безпосередній контакт охолодної речовини із провідниками обмоток і внутрішніх шарів магнітопроводов підвищує інтенсивність теплоотвода й дозволяє істотно збільшити питомі електромагнітні навантаження машини (щільність струму й максимальне значення магнітної індукції). Звичайно безпосереднє охолодження застосовують в електричних машинах досить великої потужності - турбо- і гідрогенераторах, що дозволяє значно збільшити одиничну потужність цих машин.

Самостійна робота №19

Тема: Магнітне поле СМ.

Мета: ознайомитися з розподілом магнітного поля СМ.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Коефіцієнти форми поля статора

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Як визначається амплітуда основної гармоніки індукції магнітного поля статора СМ?
- 2 Що характеризують коефіцієнти k_d й k_q ?
- 3 Від чого залежать значення k_d й k_q ?
- 4 Від чого залежить форма магнітного поля СМ?

1 Загальні поняття

Розглянемо трифазний синхронний генератор, що працює на симетричне навантаження так, що всі фази обмотки навантажені рівномірно, тобто в них наводяться однакові ЕРС і проходять рівні за значенням і зрушені по фазі відносно один одного на кут 120° струми. Відомо, що в цих умовах трифазна обмотка статора створює обертову синхронно з ротором МРС, максимальне значення якої визначається виразом (9.16):

$$F_1 = 0,45m_1 I_1 w_1 k_{об1} / p.$$

Вектор МРС статора може займати різні просторові положення щодо осі полюсів ротора.

У неявнополісній синхронній машині повітряний зазор рівномірний, а тому просторове, положення вектора МДС статора щодо осі полюсів ротора не впливає на величину й графік розподілу магнітного поля статора.

У явнополісній синхронній машині повітряний зазор нерівномірний через наявність значного межполюсного простору, не заповненого сталлю (мал. 20.3), і магнітний опір потоку статора Φ_d по поздовжній осі dd набагато менше магнітного опору потоку статора Φ_q по поперечній осі qq . Тому величина індукції магнітного поля статора й графік її розподілу в повітряному зазорі в явнополісних машинах залежать від просторового положення вектора МДС обмотки статора F_1 або його складових.

2 Коефіцієнти форми поля статора

Так, амплітуда основної гармоніки індукції магнітного поля статора по поздовжній осі B_{1d1} більше амплітуди основної гармоніки індукції поля по поперечній осі B_{1q1} :

$$B_{1d1} = B_1 k_d; \quad B_{1q1} = B_1 k_q \quad (20.6)$$

де B_1 — амплітудне значення магнітної індукції поля статора при рівномірному зазорі; k_d й k_q — коефіцієнти форми поля статора (якоря) по поздовжній і поперечній осях.

Коефіцієнти k_d й k_q визначають ступінь зменшення амплітуди основної гармоніки поля статора (якоря) по поздовжній і поперечній осях, обумовлену нерівномірністю повітряного зазору в машинах з явнополісним ротором.

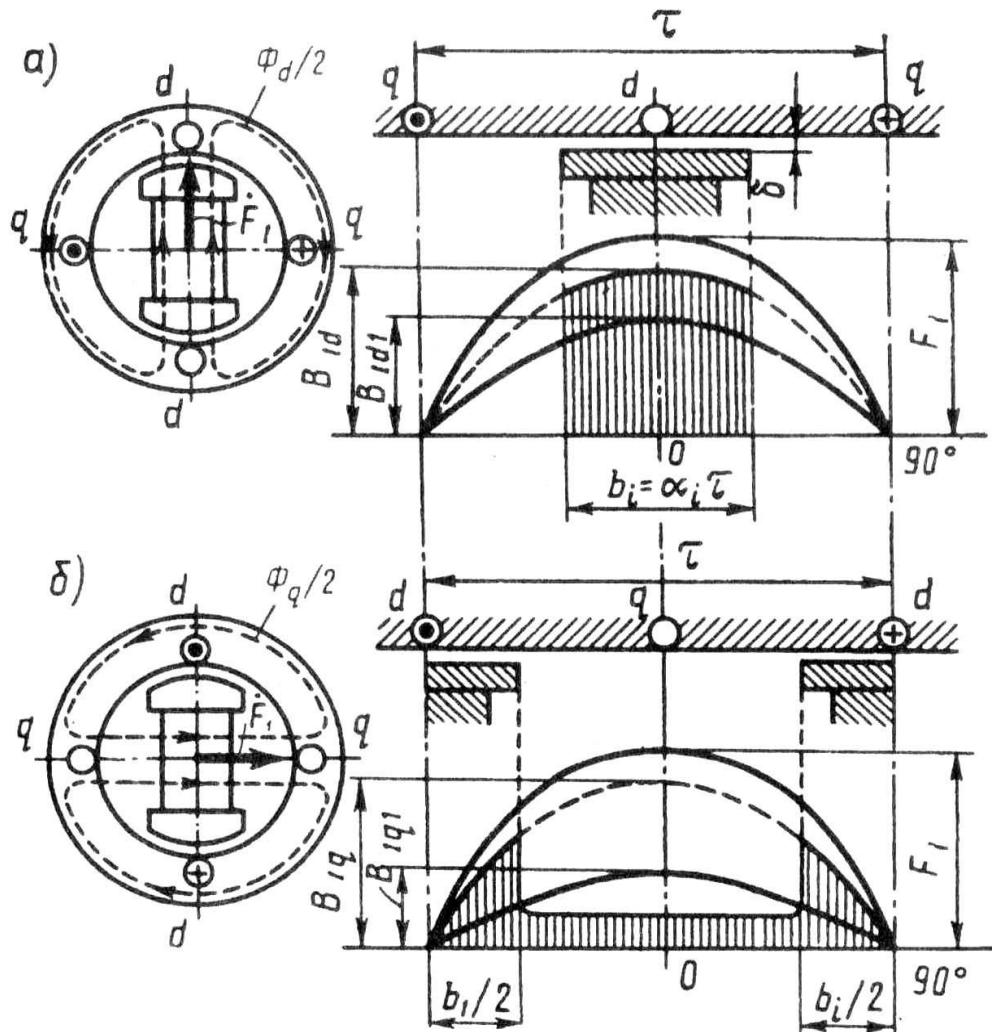


Рис. 20.3. Магнітні поля статора синхронної явнополюсної машини по поздовжній (а) і поперечній (б) осям

Значення k_d й k_q залежать від відношення максимальних і мінімального повітряних зазорів δ_{\max}/δ , від відносної величини зазору δ/τ , а також від коефіцієнта полюсного перекриття α_i . При рівномірному зазорі ($\delta = \text{const}$) відношення $\delta_{\max}/\delta = 1$. Полюсний розподіл τ визначають по (7.1). Коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_i = b_p/\tau$, де b_p — ширина полюсного наконечника (див. мал. 19.8).

При рівномірному повітряному зазорі ($\delta_{\max}/\delta = 1$) і досить малій його відносній величині ($\delta/\tau \ll 1$) коефіцієнти форми поля визначаються вираженнями

$$k_d = [\pi\alpha_i + \sin(\alpha_i 180^\circ)] / \pi; \quad (20.7)$$

$$k_q = [\pi\alpha_i - \sin(\alpha_i 180^\circ)] / \pi. \quad (20.8)$$

З (20.7) і (20.8) бачимо, що при $\alpha_i = 1$, тобто при неявнополюсному роторі, $k_d = k_q = 1$.

Обмотка порушення синхронної машини при проходженні по ній струму I_b створює МРС на парі полюсів (А):

$$F_{в.н} = I_b 2w_{к.в} \quad (20.9)$$

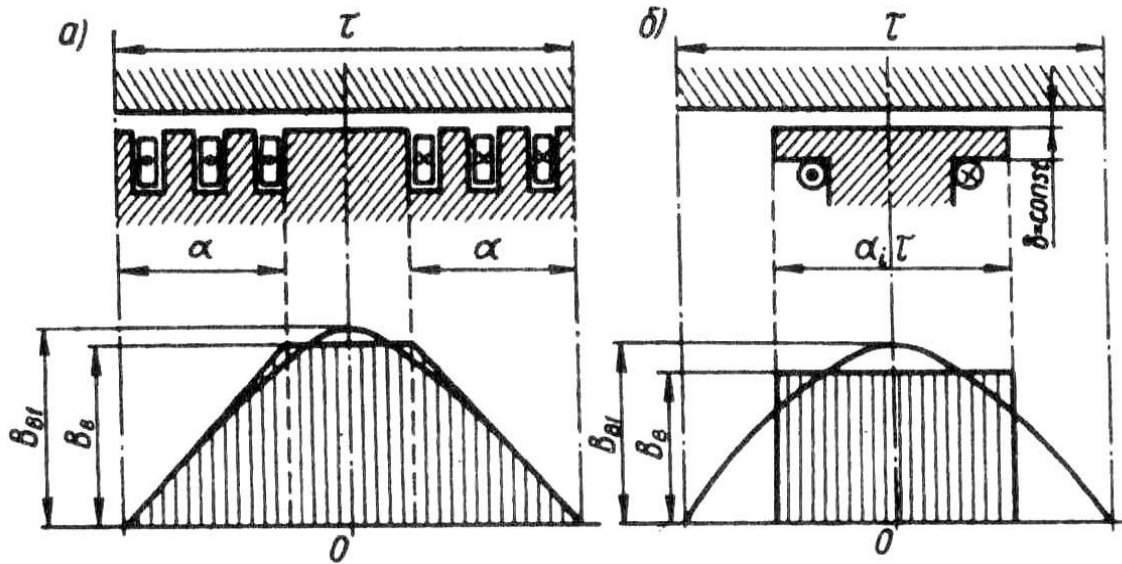


Рис. 20.4. Магнітні поля порушення неявнополюсної (а) і явнополюсної (б) синхронних машин

При цьому форма магнітного поля порушення в зазорі машини залежить від конструкції ротора. Амплітуда основної гармоніки цього поля B_{B1} визначається коефіцієнтом форми поля порушення

$$k_f = B_{B1} / B_e, \quad (20.10)$$

де B_e — максимальне значення магнітної індукції поля порушення (мал. 20.4).

Для неявнополюсного ротора коефіцієнт форми поля порушення (мал. 20.4, а)

$$k_f = 8 \sin \gamma 90 / (\pi^2 \gamma) \quad (20.11)$$

де $\gamma = 2\alpha / \tau$ - відношення обмотаної частини полюса ротора до всього полюсного розподілу. Звичайно $\gamma = 0,67$? $0,80$. Найменший зміст вищих гармонік поля відповідає $\gamma = 0,75$.

Для явнополюсного ротора при рівномірному зазорі й $\delta = \text{const}$ коефіцієнт форми поля порушення (мал. 20.4, б)

$$k_f = 4 \sin \alpha_i 90 / \pi. \quad (20.12)$$

Збільшення зазору на краях полюсів сприяє наближенню коефіцієнта k_f до одиниці, тобто наближає форму кривої індукції поля до синусоїди.

При нерівномірному повітряному зазорі значення коефіцієнтів форми поля визначають по графіках, що приводять у руководствах з розрахунку синхронних машин [5 й 15].

Самостійна робота №20

Тема: Рівняння напруг синхронного генератора (СГ).

Мета: вивести рівняння напруг СГ.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Вплив магніторушійних сил на роботу явнополюсного синхронного генератора
- 2 Рівняння напруг СГ

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Як впливає МРС на роботу явнополюсного СГ?
- 2 Як визначається ЕРС розсіювання обмотки статора СГ?
- 3 Завдяки чому створюється активний спад напруги в активному опорі обмотки статора СГ?
- 4 Як визначається напруга на виході СГ?
- 5 Виведіть рівняння напруг СГ.

1 Вплив магніторушійних сил на роботу явнополюсного синхронного генератора

Напруга на виводах генератора, що працює з навантаженням, відрізняється від напруги цього генератора в режимі х.х. Це пояснюється впливом ряду причин: реакцією якоря, магнітним потоком розсіювання, спаданням напруги в активному опорі обмотки статора.

Як було встановлено, при роботі навантаженої синхронної машини в ній виникає МРС, які, взаємодіючи, створюють результуючий магнітний потік. Однак при обліку факторів, що впливають на напругу синхронного генератора, умовно виходять із припущення незалежної дії всіх МРС генератора, тобто передбачається, що кожна із МРС створює власний магнітний потік.

Але слід зазначити, що таке подання не відповідає фізичній сутності явищ, тому що в одній магнітній системі виникає один лише магнітний потік - результуючий. Але в цьому випадку припущення незалежності магнітних потоків дає можливість краще зрозуміти вплив всіх факторів на роботу синхронної машини.

Отже з'ясуємо, яке ж впливають магніторушійні сили на роботу явнополюсного синхронного генератора.

1. МДС обмотки збудження F_{B0} , створює магнітний потік порушення Φ_0 , що, зчіплюючись із обмоткою статора, наводить у ній основну ЕРС генератора E_0

2. МДС реакції якоря по поздовжній осі F_{1d} створює магнітний потік Φ_{1d} , що наводить в обмотці статора ЕРС реакції якоря E_{1d} [див. (20.22)], значення якої пропорційно індуктивному опору реакції якоря по поздовжній осі x_{ad} [див. (20.24)]. Цей опір характеризує рівень впливу реакції якоря по поздовжній осі на роботу синхронного генератора. Так, при насиченій магнітній системі машини магнітний потік реакції якоря Φ_{1d} менше, ніж при ненасиченій магнітній системі. Порозумівається це тим, що потік Φ_{1d} майже повністю проходить по сталевих ділянках магнітопровода, переборюючи невеликий повітряний зазор (див. мал. 20.3, а), а тому при магнітному насиченні опір цьому потоку помітно зростає. При цьому індуктивний опір x_{1d} зменшується.

3. МДС реакції якоря по поперечній осі F_{1q} створює магнітний потік Φ_{1q} , що наводить в обмотці статора ЕРС E_{1q} [див. (20.23)], значення якої пропорційно індуктивному опору реакції якоря по поперечній осі x_{aq} [див. (20.25)]. Опір x_{aq} не залежить від магнітного насичення машини, тому що при явнополюсном роторі потік Φ_{1q} проходить в основному по повітрю межполюсного простору (див. мал. 20.3, б).

4. Магнітний потік розсіювання обмотки статора $\Phi_{\sigma 1}$ (див. мал. 11.4) наводить в обмотці статора ЕРС розсіювання $E_{\sigma 1}$, значення якої пропорційно індуктивному опору розсіювання фази обмотки статора x_1 :

$$E_{\sigma 1}^{\bullet} = -j I_1^{\bullet} x_1. \quad (20.26)$$

5. Струм в обмотці статора I_1 створює активне спадання напруги в активному опорі фази обмотки статора r_1 :

$$U_{a1}^{\bullet} = I_1^{\bullet} r_1 \quad (20.27)$$

2 Рівняння напруг СГ

Геометрична сума всіх перерахованих ЕРС, наведених в обмотці статора, визначає напруга на виході синхронного генератора:

$$U_1^* = \sum E^* - I_1 r_1 = E_0^* + E_{1d}^* + E_{1q}^* + E_{\sigma 1}^* - I_1 r_1. \quad (20-28)$$

Тут $\sum E^*$ — геометрична сума всіх ЕДС, наведених в обмотці статора результуючим магнітним полем машини, утвореним спільною дією всіх МДС ($F_{в.0}$, F_{1d} , F_{1q}) і потоком розсіювання статора $\Phi_{\sigma 1}$.

Активний опір фази обмотки статора r_1 у синхронних машин середньої й великої потужності невелико, і тому навіть при номінальному навантаженні спадання напруги $I_1 r_1$ становить настільки малу величину, що з деяким допущенням можна прийняти $I_1 r_1 = 0$. Тоді рівняння (20.28) можна записати у вигляді

$$U_1^* \approx \sum E^* = E_0^* + E_{1d}^* + E_{1q}^* + E_{\sigma 1}^* \quad (20.29)$$

Вираження (20.28) і (20.29) являють собою рівняння напруг явнополюсного синхронного генератора.

У неявнополюсних синхронних генераторах реакція якоря характеризується повної МДС статора F_1 без поділу її по осях, тому що в цих машинах магнітні опори по поздовжній і поперечній осях однакові. Тому ЕДС статора в неявнополюсних машинах E_1 , рівна індуктивному спаданню напруги в обмотці статора, пропорційна індуктивному опору реакції якоря x_a [див. (20.19)], тобто

$$E_1^* = -j I_1^* x_a. \quad (20.30)$$

Потік реакції якоря Φ_1 і потік розсіювання статора $\Phi_{\sigma 1}$ створюються одним струмом I_1 [зрівняєте (20.26) і (20.30)], тому індуктивні опори x_a й x_l можна розглядати як сумарний індуктивний опір

$$x_c = x_a + x_l,$$

синхронний опір, що представляє собою, неявнополюсної машини. З обліком цього ЕДС реакції якоря E_1 й ЕДС розсіювання $E_{\sigma 1}$ варто розглядати також як суму

$$E_c^* = E_1^* + E_{\sigma 1}^* = -j I_1^* x_a + (-j I_1^* x_l) = -j I_1^* x_c \quad (20.31)$$

представляюцю собою синхронну ЕДС неявнополюсної машини. З обліком викладеного рівняння напруг неявнополюсного синхронного генератора має вигляд

$$U_1^* \approx \sum E^* - I_1 r_1 = E_0^* + E_c^* - I_1 r_1 \quad (20.32)$$

або

$$U_1^* \approx \sum E^* = E_0^* + E_c^* \quad (20.33)$$

Самостійна робота №21

Тема: Векторні діаграми СГ.

Мета: ознайомитися з принципом побудови векторних діаграм СГ.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

1 Векторна діаграма СГ що працює на активно-індуктивне навантаження

2 Векторна діаграма СГ що працює на активно-ємнісне навантаження

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

1 Опишіть порядок побудови векторної діаграми явнополюсного СГ що працює на активно-індуктивне навантаження.

2 Опишіть порядок побудови векторної діаграми неявнополюсного СГ що працює на активно-індуктивне навантаження.

3 Опишіть порядок побудови векторної діаграми явнополюсного СГ що працює на активно-ємнісне навантаження.

4 Опишіть порядок побудови векторної діаграми неявнополюсного СГ що працює на активно-ємнісне навантаження.

1 Векторна діаграма СГ що працює на активно-індуктивне навантаження

Скориставшись рівнянням ЕРС (20.28), побудуємо векторну діаграму явнополюсного синхронного генератора, що працює на активно-індуктивне навантаження (струм I_1^* відстає по фазі від ЕДС E_0^*). Векторну діаграму будують на підставі наступних даних: ЕДС генератора в режимі х.х. E_0^* ; струму навантаження I_1^* , і його кута зрушення ψ_1 , відносно ЕДС E_0^* ; поздовжнього x_{ad} і поперечного x_{aq} індуктивних опорів реакції якоря; активного опору фазної обмотки статора r_1 .

При симетричному навантаженні генератора діаграму будують лише для однієї фази.

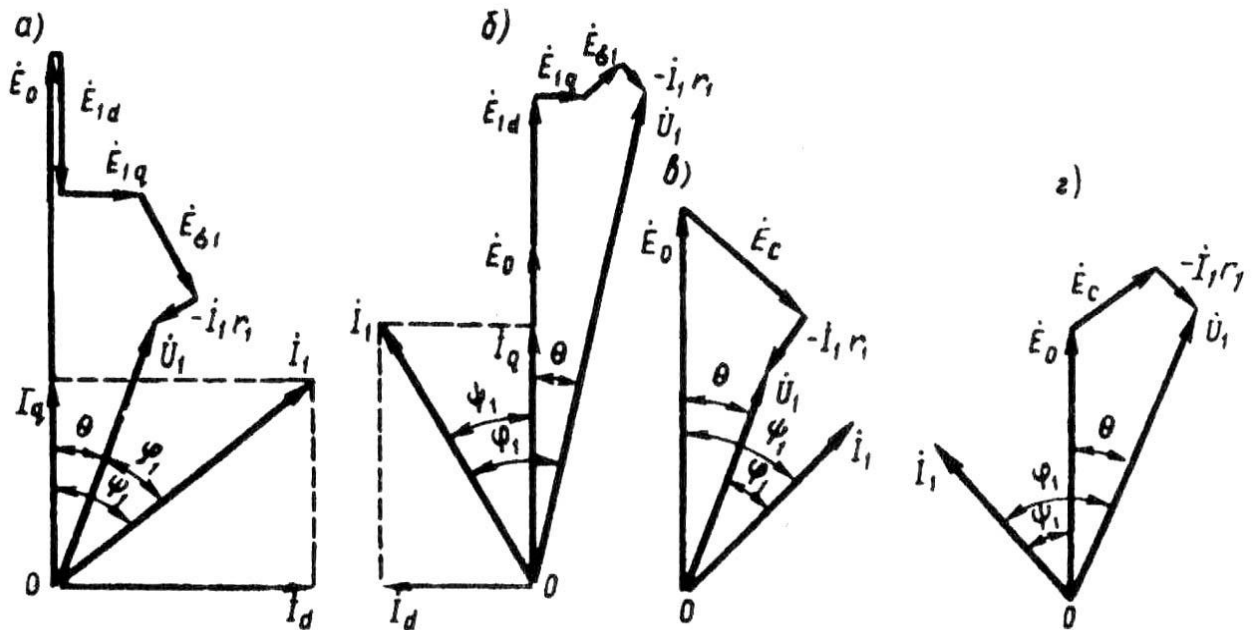


Рис. 20.8. Векторні діаграми явнополюсного (а й б) і неявнополюсного (у и г) синхронних генераторів:

а й в - при активно-індуктивному навантаженні; б и г - при активно-ємнісному навантаженні

Розглянемо порядок побудови векторної діаграми (рис 20.8, а). У довільному напрямку відкладаємо вектор ЕДС E_0^* і під кутом ψ_1 до нього — вектор струму I_1^* . Останній розкладемо на складові: реактивну $I_d^* = I_1^* \sin \psi_1$, і активну $I_q^* = I_1^* \cos \psi_1$. Далі, з кінця вектора E_0^* відкладаємо вектори ЕРС $E_{1d}^* = -j I_d^* x_{ad}$, $E_{1q}^* = -j I_q^* x_{aq}$, $E_{\sigma 1}^* = -j I_1^* x_1$, $U_{a1}^* = -I_1^* r_1$.

З'єднавши кінець вектора $U_{a1}^* = -I_1^* r_1$ із крапкою ПРО, одержимо вектор напруги U_1^* , значення якого дорівнює геометричній сумі векторів ЕДС [див. (20.28)].

2 Векторна діаграма СГ що працює на на активно-ємнісне навантаження

При побудові векторної діаграми генератора, що працює на активно-ємнісне навантаження (струм I_1^* випереджає по фазі ЕРС E_0^*), вектор струму I_1^* , відкладають уліво від вектора ЕДС (мал. 20.8, б), а напрямок вектора E_{1d}^* встановлюють згідно з напрямком вектора ЕРС E_0^* , тому що при ємнісному характері навантаження реакція якоря має подмагничивающий характер. В іншому порядку побудови діаграми залишається колишнім.

Векторну діаграму синхронного неявнополюсного генератора будують на підставі рівняння (20.32), при цьому вектор E_0^* відкладають під кутом ψ_1 до вектора струму (мал. 20.8, в)

Слід зазначити, що побудовані векторні діаграми не враховують насичення магнітного ланцюга, тому відбивають лише якісну сторону явищ. Але проте ці діаграми дають можливість зробити наступні висновки: основним фактором, що впливає на зміну напруги навантаженого генератора, є поздовжня складова магнітного потоку якоря, що створює ЕРС E_{1d}^* ; при роботі генератора на індуктивно-активно-індуктивно навантаження, тобто зі струмом I_1^* , що відстає по фазі від ЕРС E_0^* , напруга на виводах обмотки статора, зі збільшенням навантаження зменшується, що порозумівається впливом, що розмагнічує, реакції якоря. При роботі генератора на активно-ємнісне навантаження (зі струмом I_1^* , що випереджає по фазі ЕРС E_0^*) напруга U_1^* зі збільшенням навантаження підвищується, що порозумівається подмагничивающим впливом реакції якоря (мал. 20.8, г).

Самостійна робота №22

Тема: Практична діаграма ЕРС СГ.

Мета: навчитися будувати практичну діаграму ЕРС СГ.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

1 Практична діаграма ЕРС синхронного генератора

2 Приклад побудови практичної діаграми ЕРС СГ

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

1 Для чого будують практичну діаграму ЕРС СГ?

2 Поясніть принцип побудови практичної діаграми ЕРС СГ.

1 Практична діаграма ЕРС синхронного генератора

Зміна напруги синхронного генератора $\Delta U_{\text{ном}}$ при скиданні номінального навантаження можна визначити графічно - побудовою практичної діаграми ЕДС. Припустимо, що синхронний генератор працював у режимі номінального навантаження, а потім навантаження було повністю скинуте, але частота обертання й струм порушення при цьому залишилися незмінними. Напруга генератора після скидання навантаження зросло на $\Delta U_{\text{ном}}$. Для визначення цього значення проробимо наступне (мал. 20.13): в одних осях координат побудуємо характеристики холостого ходу й короткого замикання.

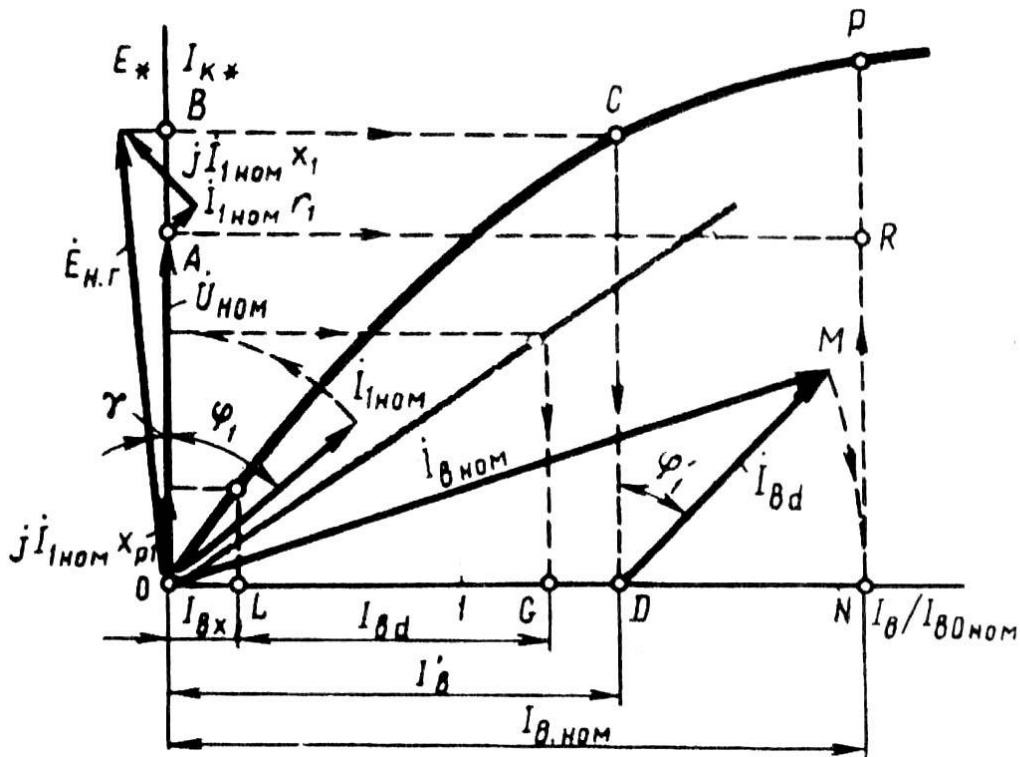


Рис. 20.13. Практична діаграма ЕДС

Потім на осі ординат побудуємо вектор $OA = U_{\text{ном}}^*$ і під кутом φ_1 до вектора OA проведемо вектор струму $I_{\text{ном}}^*$. Додавши до вектора $U_{\text{ном}}$ вектори спадання напруги $I_{\text{ном}}^* r_1$ й $j I_{\text{ном}}^* X_1$, знайдемо ЕДС навантаженого генератора:

$$E_{\text{н.г.}}^* = U_{\text{ном}}^* + I_{\text{ном}}^* r_1 + j I_{\text{ном}}^* X_1 \quad (20.36)$$

Переносячи крапку В на характеристику х.х. (крапка З), проведемо ординату CD. Отриманий на осі абсцис відрізок OD визначає струм порушення $I'_{\text{в}}$, необхідний для створення ЕДС навантаженого генератора $E_{\text{н.г.}}$. Але при роботі генератора без навантаження його ЕДС E_0 більше, ніж ЕДС $E_{\text{н.г.}}$, на значення ЕДС поздовжньої реакції якоря E_{1d} , тобто $E_0^* = E_{\text{н.г.}}^* + E_{1d}^*$.

Для урахування E_{1d}^* определим ток возбуждения $I_{\text{ед}}^*$, соответствующий продольно-размагничивающему действию реакции якоря. Проробив необхідні построения, определяем $I_{\text{ед}}^* = LG$ (рис.20.13). Затем из точки D под углом $\varphi'_1 = \varphi_1 +$

γ к CD проводим вектор $DM = I_{ed}^*$. Из центра O радиусом OM опишем дугу до пересечения с осью абсцисс в точке N. Тогда $ON = I_{a.m}^*$ - ток возбуждения, соответствующий ЭДС $E_0^* = NP$. Проведя из точки A параллельно оси абсцисс линию AR, получим

$$\Delta U_{ном} = \frac{NP - NR}{NR} \cdot 100 = \frac{E_0^* - U_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100$$

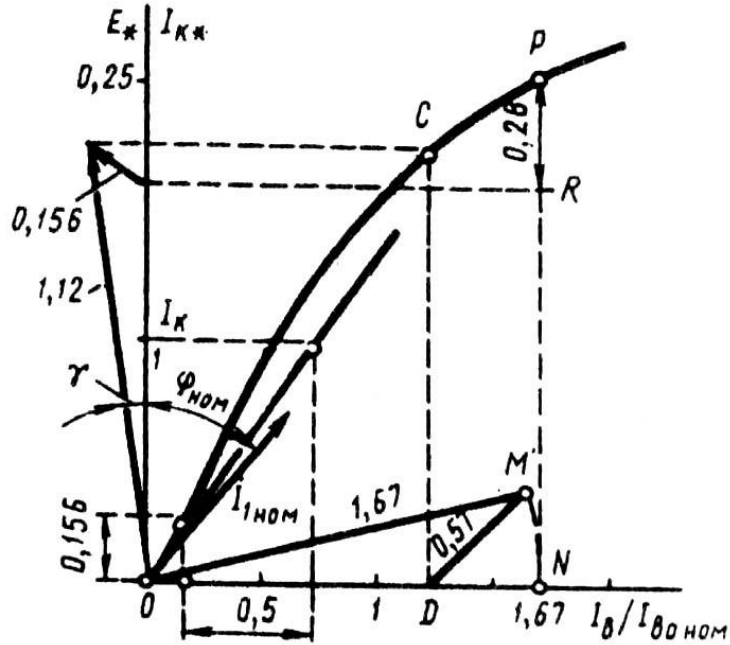


Рис. 20.14. Визначення $\Delta U_{ном}$

2 Приклад побудови практичної діаграми ЕРС СГ

Построить практическую диаграмму ЭДС для трехфазного синхронного генератора и определить повышение напряжения при сбросе нагрузки. Генератор имеет следующие данные: $P_{ном} = 500$ кВт; $U_{ном} = 230$ В; $\cos \varphi_1 = 0,8$; $x_1 = 0,04$ Ом; $r_1 = 0,0015$ Ом; ОКЗ — 1,4; характеристика х.х. нормальная (см. § 20.6), обмотка статора соединена звездой.

Решение. Для построения характеристики к.з. определим относительный ток возбуждения $I_{в.к.ном}^*$ соответствующий номинальному току нагрузки. Из (20.34) получим

$$I_{в.к.ном} / I_{в0ном} = 1 / ОКЗ = 1 / 1,4 = 0,715$$

Номинальный ток генератора

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном} 10^3}{m U_{1ф.ном} \cos \varphi_{1ном}} = 905 \text{ А.}$$

Активное падение напряжения

$$I_{1ном} r_1 = 905 \cdot 0,0015 = 1,36 \text{ В}$$

Индуктивное падение напряжения

$$I_{1ном} j x_1 = 905 \cdot j \cdot 0,04 = j36,2 \text{ В}$$

Выразим полученные величины в относительных единицах:

$$I_{1\text{ном}} r_1 / U_{1\text{ном}} = 1,36 / 230 = 0,0059; \quad I_{1\text{ном}} j x_1 / U_{1\text{ном}} = 36,2 / 230 = j0,157$$

Так как индуктивное падение напряжения в $0,157 / 0,0059 = 26$ раз больше активного, то активным падением напряжения можно пренебречь. Между напряжением $U_{1\text{ном}}^*$ и током $I_{1\text{ном}}^*$ угол сдвига фаз составляет $\varphi_1 = \arccos 0,8 = 37^\circ$.

Произведя построения в изложенном выше порядке, получим практическую диаграмму ЕРС (рис. 20.14), из которой определяем величину повышения напряжения при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{NP - NR}{NR} \cdot 100 = \frac{1,28 - 1}{1} \cdot 100 = 28\%$$

Все построения на диаграмме (рис. 20.14) выполнены в относительных единицах.

Самостійна робота №23

Тема: Втрати і коефіцієнт корисної дії СМ.

Мета: ознайомитися з видами втрат СМ та вивести формулу для визначення коефіцієнту корисної дії СМ.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Втрати СМ
- 2 Коефіцієнт корисної дії СМ

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Які є види втрат в СМ?
- 2 Які втрати виникають в осерді статора СМ?
- 3 Які втрати виникають в обмотці статора СМ?
- 4 Які є додаткові втрати в СМ?
- 5 Від чого залежить ККД СМ?

1 Втрати СМ

Перетворення енергії в синхронній машині пов'язане із втратами енергії. Всі види втрат у синхронній машині розділяються на основні й додаткові.

Основні втрати в синхронній машині складаються з електричних втрат в обмотці статора, втрат на порушення, магнітних втрат і механічних втрат.

Електричні втрати в обмотці статора (Вт)

$$P_{\sigma 1} = m_1 I_1^2 r_1 \quad (20.37)$$

де r_1 — активний опір однієї фази обмотки статора при розрахунковій робочій температурі, Ом.

Втрати на збудження (Вт):

а) при порушенні від окремого збуджувального пристрою

$$P_{\sigma} = I_{\sigma}^2 r_{\sigma} + \Delta U_{щ} I_{\sigma} \quad (20.38)$$

де r_{σ} — активний опір обмотки збудження при розрахунковій робочій температурі, Ом; $\Delta U_{щ} = 2 U$ — спадання напруги в щітковому контакті щіток;

б) при порушенні від генератора постійного струму (збудника), зчленованого з валом синхронної машини,

$$P_{\sigma} = (I_{\sigma}^2 r_{\sigma} + \Delta U_{щ} I_{\sigma}) / \eta_{\sigma} \quad (20.39)$$

де $\eta_{\sigma} = 0,80 \div 0,85$ - КПД збудника.

Магнітні втрати синхронної машини відбуваються в сердечнику статора, що підданий перемагнічуванню обертовим магнітним полем. Ці втрати складаються із втрат від гістерезису P_{Γ} і втрат від вихрових струмів $P_{в.т}$:

$$P_{\Gamma} = P_{\Gamma} + P_{в.т} \quad (20.40)$$

Механічні втрати (Вт), рівні сумі втрат на тертя в підшипниках і втрат на вентиляцію (при самовентиляції машини),

$$P_{\text{мех}} \approx 3,68p \left(\frac{v_2}{40} \right)^3 \sqrt{10^3 l_1} \quad (20.41)$$

де

$$v_2 = \pi (D_1 - 2\delta) n_{1/60} \quad (20.42)$$

— колова швидкість на поверхні полюсного наконечника ротора, м/с; l_1 — конструктивна довжина сердечника статора, мм.

Додаткові втрати в синхронних машинах розділяються на два види: пульсационні втрати в полюсних наконечниках ротора й втрати при навантаженні.

Додаткові пульсационні втрати P_{Π} у полюсних наконечниках ротора обумовлені пульсацією магнітної індукції в зазорі через зубчатості внутрішньої поверхні статора. Значення цих втрат (Вт)

$$P_{\Pi} = k_{\Pi} p b_{\Pi} l_1 (10^{-4} Z_1 n_1)^{1,5} [B_{\delta} (k_{\delta 1} - 1) t_1]^2 \cdot 10^{-6}, \quad (20.43)$$

де k_{Π} - коефіцієнт, що враховує товщину аркушів полюсів ротора (при товщині аркушів 1 мм $k_{\Pi} = 4,6$; при товщині аркушів 2 мм $k_{\Pi} = 8,6$; при масивних полюсних наконечника $k_{\Pi} = 23,3$); b_{Π} — ширина полюсного наконечника, мм; Z_1 — число пазів на статорі; B_{δ} - магнітна індукція в зазорі, Тл; $k_{\delta 1}$ - коефіцієнт повітряного зазору статора; t_1 - зубцове розподіл статора, мм.

Додаткові втрати при навантаженні $P_{\text{доб}}$ у синхронних машинах визначають у відсотках від подводимой потужності двигунів або від корисної потужності генераторів. Для синхронних машин потужністю до 1000 квт додаткові втрати при

навантаженні приймають рівними 0,5%, а для машин потужністю більше 1000 квт - 0,25-0,4%. Сумарні втрати в синхронній машині (квт)

$$\sum P = (P_{\Sigma l} + P_{\Sigma} + P_{\Sigma l} + P_{\Sigma \text{ мех}} + P_n + P_{\Sigma \text{ дооб}}) \cdot 10^{-3} \quad (20.44)$$

2 Коефіцієнт корисної дії СГ

Коефіцієнт корисної дії: для синхронного генератора

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \sum P / (P_{\text{ном}} + \sum P) \quad (20.45)$$

де

$$P_{\text{ном}} = m_1 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} \cos \varphi_1 \cdot 10^{-3} \quad (20.46)$$

- активна потужність, що відбирає від генератора при його номінальному навантаженні, квт;

для синхронного двигуна

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \sum P / P_{1\text{ном}} \quad (20.47)$$

Тут $U_{1\text{ном}}$ й $I_{1\text{ном}}$ — фазні значення напруги й струму статора.

КПД синхронної машини залежить від величини навантаження ($\beta = P_2 / P_{\text{ном}}$) і від її характеру ($\cos \varphi_1$). Графіки цієї залежності аналогічні зображеним на мал. 1.41. КПД синхронних машин потужністю до 100 квт становить 80-90%, у могутніших машин КПД досягає 92-99%. Більше високі значення КПД ставляться до турбо- і гідрогенераторів потужністю в десятки й навіть сотні тисяч кіловат.

Самостійна робота №24

Тема: U-подібні характеристики СГ.

Мета: ознайомитися з призначенням U-подібної характеристики синхронного генератора та навчитися її будувати.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Побудова U-подібної характеристики синхронного генератора

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Що відбувається в СГ при зміні струму в обмотці збудження?
- 2 Поясніть процес перезбудження СГ.
- 3 Поясніть процес недозбудження СГ.
- 4 На що впливає ступінь збудження СГ?
- 5 Для чого необхідна побудова U-подібної характеристики СГ?
- 6 Поясніть принцип побудови СГ.

1 Загальні поняття

Раніше ми розглядали паралельну роботу синхронного генератора при незмінному струмі порушення. Що ж відбудеться в синхронному генераторі, якщо після підключення його до мережі для паралельної роботи змінити струм у його обмотці збудження, залишивши незмінним обертаючий момент приводного двигуна? Припустимо, що генератор після підключення на мережу працює без

навантаження і його ЕРС \dot{E}_0 урівноважує напругу мережі \dot{U}_C . Е цьому збільшити струм в обмотці збудження, тобто *перезбудити* машину, то ЕРС \dot{E}_0 збільшиться до значення \dot{E}'_0 й у ланцюзі генератора з'явиться надлишкова ЕДС $\Delta\dot{E} = \dot{E}'_0 - \dot{U}_C$ (мал. 21.10, а), вектор якої збігається по напрямку з вектором ЕРС \dot{E}_0 . Струм i_d , викликаний ЕРС $\Delta\dot{E}$, буде відставати від її по фазі на 90° (оскільки $r_1 \approx 0$). Стосовно ЕРС \dot{E}_0 цей струм також буде відстаючим (індуктивним). Зі збільшенням перепорушення значення реактивного (індуктивного) струму збільшиться.

Якщо після того, як генератор підключений до мережі, зменшити струм порушення, тобто *недозбудити* машину, то ЕРС \dot{E}_0 зменшиться до значення \dot{E}''_0 й у ланцюзі генератора знову буде діяти надлишкова ЕРС $\Delta\dot{E} = \dot{U}_C$. Тепер вектор цієї ЕДС буде збігатися по напрямку з вектором напруги мережі \dot{U}_C (мал. 21.10, б), і тому струм i_d , викликаний цієї ЕРС і відстаючої від її по фазі на 90° , буде випереджальним (ємнісним) стосовно ЕРС генератора \dot{E}_0 .

Виконане на векторних діаграмах можна пояснити наступної При перепорушенні генератора збільшується МРС порушення $F_0 = I_B w_B$.

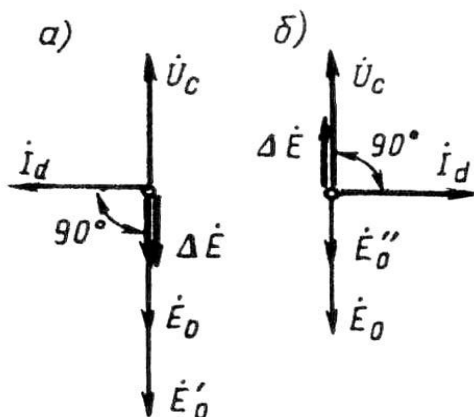


Рис. 21.10. Векторні діаграми ЕРС синхронного генератора, включеного на паралельну роботу.

Це супроводжується появою в обмотці статора реактивного струму I_d , яким стосовно ЕРС є відстаючим (індуктивним). Ви кликана цим струмом реакція, що повздовжньо-розмагнічує, якоря компенсує надлишкову МРС порушення так, що ЕРС генератора залишається незмінної. Такий же процес відбувається й при недопорушенні генератора з тією лише різницею, що в обмотці з'являється

випереджальний (ємнісний) струм I_d , а викликана цим струмом реакція, що повздошно^намагнічує, якоря компенсує відсутню МДС порушення.

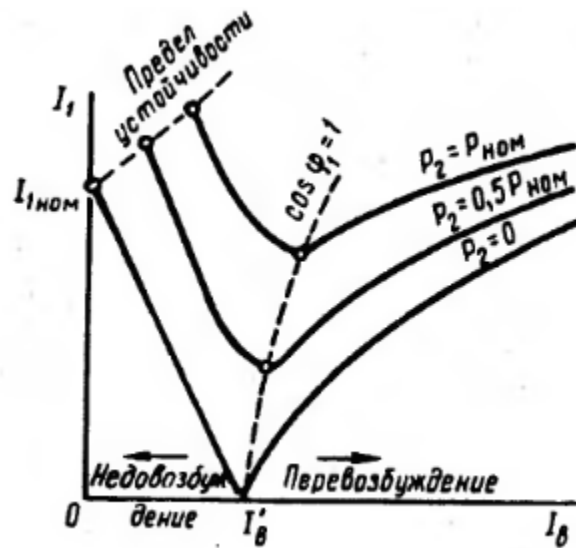


Рис. 21-11. U-образні характеристики синхронного генератора.

Варто мати на увазі, що струм I_d , що відстає по фазі від ЕДС \dot{E}_0 , стосовно напруги мережі \dot{U}_c є випереджальним струмом й, навпаки, струм I_d , що випереджає по фазі ЕРС \dot{E}_0 , є відстаючим стосовно напруги \dot{U}_c .

Есчи при всіх змінах струму порушення обертаючий момент приводного двигуна залишається незмінним, те також незмінної залишається активна потужність генератора:

$$P_2 = m_1 U_c I_1 \cos \varphi_1 = const$$

Із цього вираження бачимо, що при $U_c = const$ активна складова струму статора $I_q = I_1 \cos \varphi_1 = const$.

Таким чином, ступінь порушення синхронного генератора впливає тільки на реактивну складову струму статора. Що ж стосується активної складової струму $I_q = I_1 \cos \varphi_1$, то вона залишається незмінної.

2 Побудова U-подібної характеристики синхронного генератора

Залежність струму статора I_1 від струму в обмотці збудження I_B при незмінному активному навантаженні генератора виражається графічно U-образної кривої. На мал. 21.11 представлені U-образні характеристики $I_1 = f(I_B)$ при $P_2 = const$, побудовані для різних значень активного навантаження: $P_2 = 0$; $P_2 = 0,5 P_{ном}$ й $P_2 = P_{ном}$. U-образні характеристики синхронного генератора показують, що будь-якому навантаженню генератора відповідає таке значення струму порушення I_B' , при якому струм статора I_1 стає мінімальною й рівним тільки активною складовою: $I_{1min} = I_1 \cos \varphi_1 = I_q$. У цьому випадку генератор працює при коефіцієнті потужності $\cos \varphi_1 = 1$. Значення струму порушення, що відповідають $\cos \varphi_1 = 1$ при різному навантаженні генератора, показані на мал. 21.11 пунктирної кривої. Деяке відхилення цієї кривої вправо вказує на те, що при збільшенні

навантаження струм порушення, що відповідає $\cos \varphi_1 = 1$, трохи зростає. Порозумівається це тим, що при росту навантаження необхідно деяке збільшення струму порушення, що компенсує активне спадання напруги.

Необхідно мати у виді, що при поступовому зменшенні струму порушення настає таке мінімальне його значення, при якому магнітний потік обмотки збудження виявляється настільки ослабленим, що синхронний генератор випадає із синхронізму — порушується магнітний зв'язок між збудженими полюсами ротора й обертовим полем статора. Якщо з'єднати всі крапки мінімально припустимих значень струму порушення на U-образних характеристиках (штрихова лінія в лівій частині мал. 21.11), то одержимо лінію *межі стійкості* роботи синхронного генератора при недопорушенні.

З погляду зменшення втрат генератора найбільш вигідним є порушення, що відповідає мінімальному струму статора, тобто коли $\cos \varphi_1 = 1$. Але в більшості випадків навантаження генератора має індуктивний характер і для компенсації індуктивних струмів (щовідстають по фазі від напруги мережі) доводиться трохи перезбуджувати генератор, створюючи умови, при яких струм статора I_1 , випереджає по фазі напруга мережі U_c . Слід зазначити, що для збереження $\cos \varphi_1$, незмінним при змінах активного навантаження генератора потрібне одночасна зміна струму порушення генератора.

Самостійна робота №25

Тема: Перехідні процеси в СГ.

Мета: ознайомитися із сутністю перехідних процесів в СГ.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Пояснення перехідного процесу в СГ

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 В чому полягає суть перехідних процесів СГ?
- 2 Що таке надпровідний контур?
- 3 Які процеси відбуваються в СГ при трифазному короткому замиканні?
- 4 Що таке ударний струм?
- 5 Як можна зменшити значення ударного струму?

1 Загальні поняття

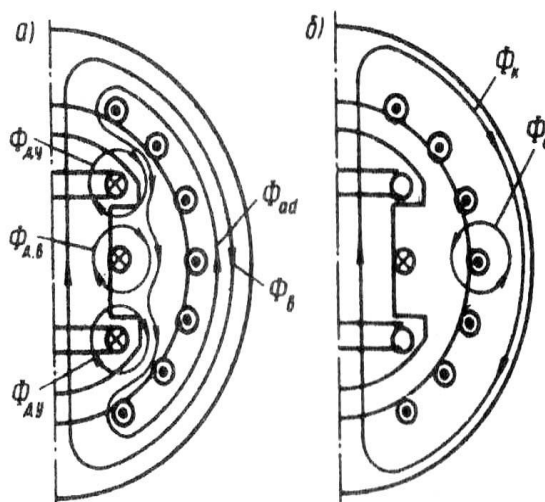


Рис. 21-12. картина магнітного поля при раптовому к. з.

Принципова відмінність перехідних процесів від розглянутих раніше сталих полягає в тому, що при сталих процесах роботи синхронного генератора із симетричним навантаженням у сердечнику й обмотках ротора не індуються ніякі струми. У той же час при перехідних процесах і несиметричних навантаженнях між ротором і статором виникають трансформаторні зв'язки.

Найбільший інтерес представляє перехідний процес при раптовому трифазному короткому замиканні синхронного генератора. Перехідний процес при різких змінах навантаження, наслідком якого є коливання синхронної машини, був розглянутий в § 21.4.

При розгляді перехідного процесу синхронного генератора зневажають активним опором його обмоток, т. е. ці обмотки вважають *надпровідниками*. Це допущення в значній мірі полегшує вивчення процесу, не вносячись помітної погрішності, особливо для великих машин, у яких активний опір обмоток досить мало. Таким чином, перш ніж перейти до розгляду раптового к. з., введемо поняття про *надпровідний контур*, для якого по другому закону Кирхгофа можна записати $d\psi / dt = 0$.

У будь-який момент часу повне потягосцеплення надпровідного контуру

$$\psi = \psi_{\text{внеш}} + \psi_L = \text{const} \quad (21.21)$$

де $\psi_{\text{внеш}}$ й ψ_L , — потягосцеплення, обумовлені зовнішньою причиною й самоіндукцією відповідно.

2 Пояснення перехідного процесу в СГ

Розглянемо раптове трифазне к. з. синхронного генератора на його затискачах. Будемо вважати, що попередньо цей генератор працював у режимі х.х., тобто в ньому діяв єдиний магнітний потік Φ_B обмотки збудження, у якій проходив струм I_{B0} . При к. з. з'являється обертовий синхронно з ротором магнітний потік статора по поздовжній осі (обмотка статора являє собою чисто індуктивне навантаження) Φ_{ad} , спрямований проти потоку Φ_B (мал. 21.12, а). При цьому в обмотці збудження й у заспокійливій обмотці будуть індуються додаткові

струми $i_{д.в}$ й $i_{д.у}$, які відповідно до правила Ленца перешкоджають зміні результуючого магнітного потоку в машині. Ці струми створюють власні магнітні потоки $\Phi_{д.в}$ й $\Phi_{д.у}$, які протидіють проникненню потоку $\Phi_{ад}$ в сердечник ротора, тобто будуть витіснити його в повітряний зазор міжсмужного простору. У результаті потік статора значно зменшиться до значення $\Phi_{ад}'' < \Phi_{ад}$. Відповідно зменшиться й індуктивний опір обмотки статора по поздовжній осі, досягши значення $x_d'' < x_d$. Тому в початковий момент перехідного процесу, названого *сверхпереходным*, що діє значення струму раптового до з. має найбільшу величину — *ударний струм короткого замикання*

$$I_{к.наиб} = E_0 / x_d'', \quad (21.22)$$

де x_d'' — *сверхпереходное індуктивний опір*.

Обмотки збудження й заспокійлива все-таки мають деякий активний опір, а тому індукціруемые в них додаткові струми $i_{д.в}$, і $i_{д.у}$ будуть поступово загасати. Однак цей процес загасання протікає неоднаково, тому що заспокійлива обмотка й обмотка збудження мають різні постійні часу T . Обмотка збудження, маючи значне число витків у порівнянні із заспокійливою обмоткою, має більшу індуктивність, а тому $T_B > T_Y$.

Поэтому до моменту часу, коли додатковий струм $i_{д.у}$ у заспокійливій обмотці зменшиться до нуля, додатковий струм $i_{д.в}$ ще має деяке значення. При цьому магнітний потік реакції якоря частково буде проходити через ротор, отчого його значення трохи зростає до значення $\Phi_{ад}' > \Phi_{ад}''$. Відповідно зростає індуктивний опір статора по поздовжній осі, досягши значення $x_d' > x_d''$, названого *перехідним індуктивним опором*. При цьому струм раптового к. з. трохи зменшиться до значення

$$I_{к}' = E_0 / x_d'. \quad (21.23)$$

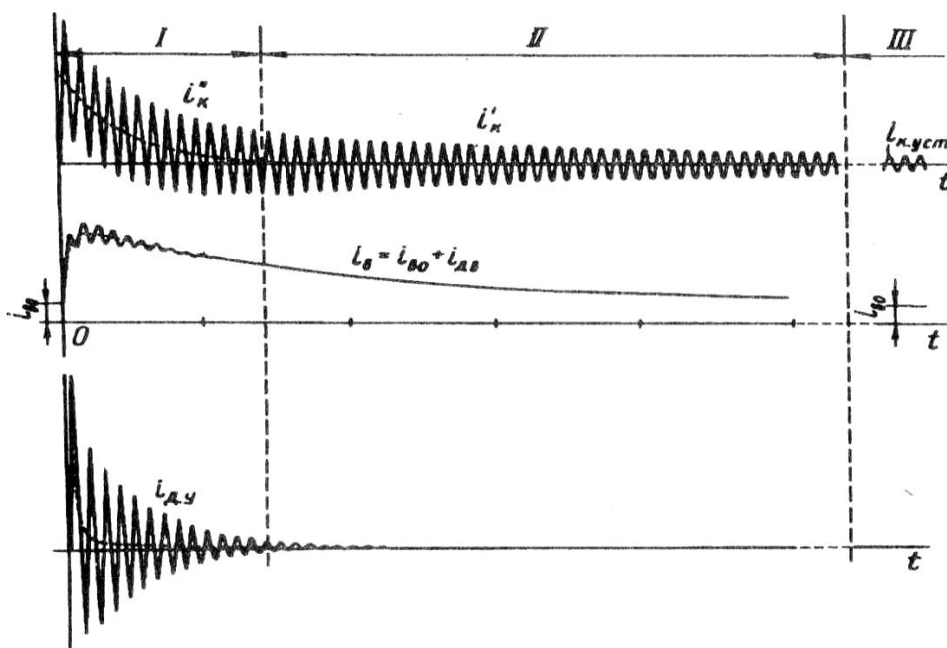


Рис. 21.13. Осциллограммы струмів при раптовому к. з.

Через якийсь час зменшиться до нуля й додатковий струм в обмотці збудження $i_{Д.В}$. При цьому потік статора буде замикатися повністю через ротор і його значення стане ще більше ($\Phi_{ad} > \Phi'_{ad}$). Відповідно зросте й індуктивний опір статора, досягши значення $x_d > x'_d$, а струм к. з.

$$I_k = E_0 / x_d \quad (21.24)$$

У результаті в генераторі встановиться результуючий магнітний потік (мал. 21.12, б) $\Phi_k = \Phi_B - \Phi_{ad}$.

Зі зменшенням магнітного потоку, зчепленого з обмоткою статора, зменшиться ЕДС статора до значення $E_k < E_0$, що приведе до зменшення струму к. з. до сталого значення

$$I_{к.уст} = E_k / x_d \quad (21.25)$$

Таким чином, при раптовому трифазному к. з. відбувається поступове загасання струму к. з. Якщо, наприклад, пік струму (ударний струм) при раптовому к. з. досягає 15-кратного значення, то сталий струм к. з. досягає 1,5-кратного (для турбогенераторів) або 2,5-кратного (для гідрогенераторів) значення при струмі порушення, що відповідає номінальному навантаженню. У деяких випадках струм $I_{к.уст}$ може виявитися навіть менше номінального. Причина настільки малого струму при сталому к. з. полягає в тому, що генератор розмагнічується полем реакції якоря.

На мал. 21.13 представлені осцилограми струмів синхронного генератора при раптовому к. з., де відзначені три характерних ділянки: *I* — свержпереходний процес; *II* — перехідний процес; *III* — стале к. з.

Ударний струм к. з. створює значні електромагнітні сили, що діють на обмотку статора. Особливу небезпеку ці сили представляють для лобових частин обмотки, що вимагає застосування спеціальних заходів для їхнього зміцнення, особливо в турбогенераторах, де лобові частини мають значний виліт.

При раптовому к. з. синхронного генератора виникають також значні електромагнітні моменти, що діють на статор і ротор. У найбільш несприятливих умовах миттєве значення такого моменту досягає десятикратної величини в порівнянні з номінальним моментом. Це необхідно враховувати при механічних розрахунках деяких деталей машини і її кріплень до фундаменту. Режим короткого замикання небажаний ще й тому, що він порушує паралельну роботу синхронних генераторів.

З погляду зменшення ударного струму к. з. корисним є збільшення магнітного потоку розсіювання обмотки статора $\Phi_{\sigma 1}$, тому що це веде до росту індуктивного опору $x_d = x_{ad} + x_1$. Однак не слід забувати й про шкідливу дію магнітного потоку розсіювання: зменшенні корисного магнітного потоку й росту внутрішнього спадання напруги (за рахунок збільшення індуктивного опору обмотки).

Самостійна робота №26

Тема: Пуск синхронного двигуна.

Мета: ознайомитися з умовами пуску СД.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Умови пуску синхронного двигуна
- 2 Асинхронні моменти при пуску синхронного двигуна

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Чому СД неможна запустити безпосереднім ввімкненням в мережу?
- 2 Поясніть принцип асинхронного пуску СД.
- 3 Що таке момент входу СД в синхронізм?
- 4 Які моменти виникають в СД при асинхронному пуску?

1 Умови пуску синхронного двигуна

Пуск синхронного двигуна безпосереднім включенням у мережу неможливий, тому що ротор через свою значну інерцію не може бути відразу захоплений обертовим полем статора, частота обертання якого встановлюється миттєво. У результаті стійкий магнітний зв'язок між статором і ротором не виникає. Для пуску синхронного двигуна доводиться застосовувати спеціальні способи, сутність яких складається в попереднім приведенні ротора в обертання до синхронної або близької до неї частоти, при якій між статором і ротором устанавлюється стійкий магнітний зв'язок.

У цей час практичне застосування має спосіб пуску, що одержав назву *асинхронного*. Цей спосіб пуску можливий при наявності в полюсних наконечниках ротора пускової обмотки (клітки), аналогічній заспокійливій обмотці синхронного генератора (див. мал. 21.8). Схема включення двигуна при цьому способі пуску наведена на мал. 22.3, а. Незбуджений синхронний двигун включають у мережу. Виникле при цьому обертове магнітне поле статора наводить у стрижнях пускової клітки ЕРС, які створюють струми I_2 .

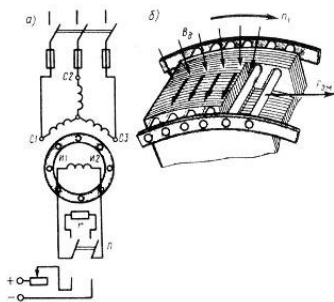


Рис. 22.3. Асинхронний пуск синхронного двигуна

Взаємодія цих струмів з полем статора викликає поява на стрижнях пускової клітки електромагнітних сил $F_{\text{ЭМ}}$. Під дією цих сил ротор приводиться в обертання (мал. 22.3, б). Після розгону ротора до частоти обертання, близької до синхронного ($n_2 \approx 0,95n_1$), обмотку збудження підключають до джерела постійного струму. Образуючийся при цьому синхронний момент [див. (21.10)] втягує ротор двигуна в синхронізм. Після цього пускова обмотка двигуна виконує функцію заспокійливої обмотки, обмежуючи хитання ротора (див. § 21.4).

Чим менше навантаження на валу двигуна, тим легше його входження в синхронізм. Явнополюсные двигуни малої потужності, що пускають без навантаження на валу, іноді входять у синхронізм лише за рахунок реактивного моменту, тобто навіть без включення обмотки збудження.

2 Асинхронні моменти при пуску синхронного двигуна

Зі збільшенням навантажувального моменту на валу входження двигуна в синхронізм утрудняється. Найбільший навантажувальний момент, при якому ротор синхронного двигуна ще втягується й синхронізм, називають *моментом входу двигуна в синхронізм* $M_{\text{вх}}$. Величина асинхронного моменту M_a при частоті обертання $n_2 \approx 0,95n_1$ залежить від активного опору пускової клітки, тобто від

перетину стрижнів і питомого електричного опору металу, з якого вони виготовлені (див. мал. 13.б).

Необхідно звернути увагу, що вибір опору пускової клітки r_2'' , що відповідає значному пусковому моменту (M''), сприяє зменшенню моменту входу в синхронізм ($M'_{\text{вх}}$) й, навпаки, при опорі r_2' , що відповідає невеликому пусковому моменту (M'_n), момент входу в синхронізм збільшується ($M'_{\text{вх}} > M''_{\text{вх}}$) (мал. 22.4).

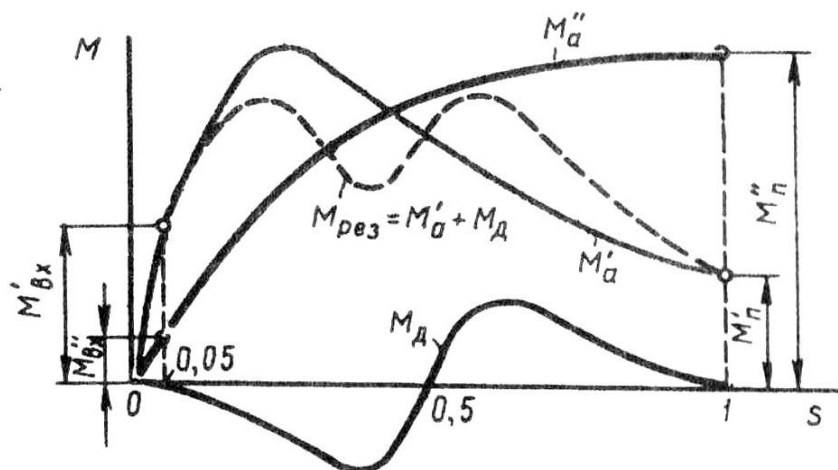


Рис. 22.4. Асинхронні моменти при пуску синхронного двигуна:

M_a , — основний момент;

$M_д$ — додатковий момент,

$M_{\text{вх}}$ — момент входу в синхронізм

У процесі асинхронного пуску обмотку збудження не можна залишати розімкнутою, тому що магнітний потік статора, що перетинає її в початковий період пуску із синхронною швидкістю, наводить у ній ЕРС. Внаслідок великої кількості витків обмотки збудження ця ЕРС досягає значень, небезпечних як для цілості ізоляції самої обмотки, так і для обслуговуючого персоналу. Для запобігання цього обмотку збудження на період розгону ротора замикають на активний опір r , приблизно в десять разів більше опору обмотки збудження. Перемикач затискачів $И1$ й $И2$ обмотки збудження з опору r на затискачі збудника здійснюють перемикачем $П$ (див. мал. 22.3, а).

Замикання накоротко обмотки збудження на час пускання двигуна небажано, тому що при цьому обмотка ротора утворює однофазний замкнутий контур, взаємодію якого з обертовим полем статора також створює *додатковий асинхронний момент* $M_д$. Однак при частоті обертання, рівній половині синхронної, цей момент стає гальмуючим (мал. 22.4) і створює «провал» у характеристиці пускового (асинхронного) моменту (пунктирна крива). Це помітно погіршує пускові властивості синхронного двигуна.

При асинхронному пуску синхронного двигуна виникає значний пусковий струм. Тому пуск синхронних двигунів безпосереднім включенням у мережу на номінальну напругу застосовують при достатній потужності мережі, здатної

витримувати без помітного спадання напруги кидки пускового струму п'яти- або семиразового значення (у порівнянні з номінальним струмом). Якщо ж потужність мережі недостатня, то можна застосувати пуск двигуна при зниженій напрузі (див. § 15.2): автотрансформаторний або реакторний.

Самостійна робота №27

Тема: Робочі характеристики СД.

Мета: ознайомитися з робочими характеристиками СД.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

1 Робочі характеристики СД

2 Переваги СД

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

1 Що представляють собою робочі характеристики СД?

2 Побудуйте робочі характеристики СД.

3 Що відбувається зі струмом в обмотці статора зі збільшенням навантаження на валу СД?

4 Як можна визначити напрямок обертання ротора СД?

5 Які переваги мають СД в порівнянні із АД?

1 Робочі характеристики СД

Робочі характеристики синхронного двигуна являють собою залежність частоти обертання ротора n_2 , споживаної потужності P_1 , корисного моменту M_2 , коефіцієнта потужності $\cos \varphi_1$, і струму в обмотці статора I_1 від корисної потужності двигуна P_2 (мал. 22.6). Частота обертання ротора n_2 завжди дорівнює синхронній частоті $n_1 = f_1 60 / p$, тому графік $n_2 = f(P_2)$ має вигляд прямої, паралельної осі абсцис. Корисний момент на валу синхронного двигуна $M_2 = P_2 / \omega_1$. Тому що робочі характеристики знімають за умови $f_1 = const$, то графік $M_2 = f(P_2)$ має вигляд прямої, що виходить із початку координат. Потужність на вході двигуна $P_1 = P_2 + \Sigma P$. З ростом навантаження на валу двигуна збільшуються також і втрати ΣP , тому споживана потужність P_1 росте швидше корисної потужності P_2 й графік $P_1 = f(P_2)$ має трохи криволінійний вид.

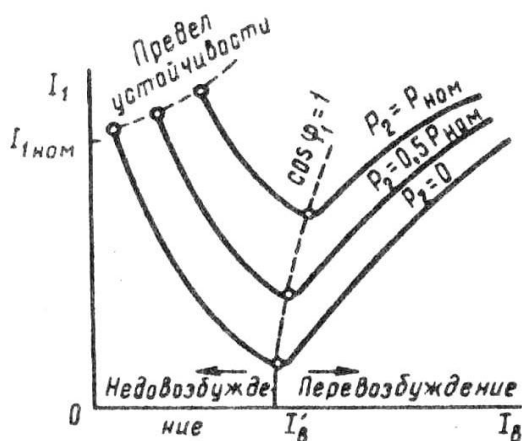


Рис. 22.5 U-образні характеристики синхронного двигуна

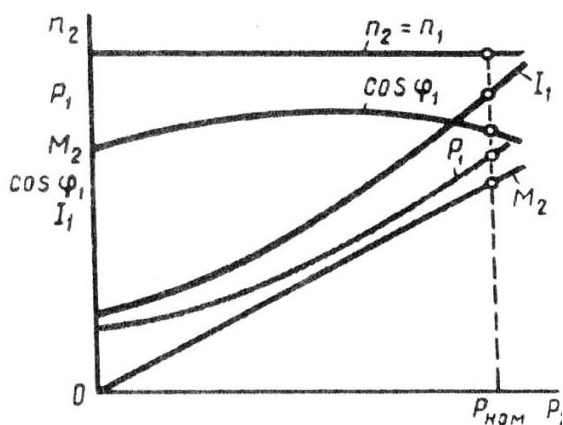


Рис. 22.6. Робочі характеристики синхронного двигуна

Вид графіка $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ залежить від виду настроювання струму порушення: якщо в режимі х.х. струм порушення встановлений таким, що $\cos \varphi_1 = 1$, то з ростом навантаження коефіцієнт потужності знижується, якщо ж установити

$\cos \varphi_1 = 1$ при номінальному навантаженні, то при недовантаженні двигун буде забирати з мережі реактивний випереджальний струм, а при перевантаженні — відстаючий. Звичайно встановлюють струм порушення таким, щоб $\cos \varphi_1 = 1$ при середнім навантаженні (мал. 22.6). У цьому випадку коефіцієнт потужності у всьому діапазоні навантажень залишається досить високим. Якщо ж установити струм в обмотці збудження синхронного двигуна таким, щоб $\cos \varphi_1 = 1$ був при навантаженні трохи перевищуючої номінальну, то при номінальному навантаженні $\cos \varphi_1 \approx 0,8$ й двигун буде споживати з мережі випереджальний стосовно напруги мережі струм, що приведе до підвищення коефіцієнта потужності цієї мережі. Щодо цього синхронні двигуни вигідно відрізняються від асинхронних, працюючих з відстаючим по фазі струмом (особливо при недовантаженні двигуна) і енергетичні показники, що знижують, живильної мережі.

Струм в обмотці статора двигуна $I_1 = P_1 / (m_1 U_1 \cos \varphi_1)$. Із цього вираження видно, що струм I_1 зі збільшенням навантаження на валу двигуна росте швидше, ніж споживана потужність P_1 , внаслідок зменшення $\cos \varphi_1$.

Тому що ротор синхронного двигуна обертається в ту ж сторону, що й поле статора, то напрямок обертання ротора визначається порядком проходження фаз лінійних проводів, підведених до обмотки статора, і порядком розташування фаз обмотки статора. Для зміни напрямку обертання трифазного синхронного двигуна необхідно перемкнути два лінійних приводи, підведених з мережі до виводів обмотки статора (див. § 9.3).

2 Переваги СД

На закінчення необхідно відзначити, що синхронні двигуни в порівнянні з асинхронними мають перевагу, що полягає в тім, що вони можуть працювати з $\cos \varphi_1 = 1$, не створюючи в щей мережі індуктивних струмів, що викликають додаткові втрати енергії. Більше того, при роботі з перепорушенням синхронні двигуни створюють у мережі ємнісний струм, чим сприяють підвищенню коефіцієнта потужності енергосистеми в цілому. Інше достоїнство синхронних двигунів полягає в тому, що, як це треба з (21.11), основна складова електромагнітного моменту пропорційна напрузі мережі U_1 , а в асинхронних двигунів електромагнітний момент пропорційний U_1^2 [див. (13.14)]. Із цієї причини при зниженні напруги в мережі синхронні двигуни зберігають більшу перевантажувальну здатність, чим асинхронні.

До недоліків синхронних двигунів ставляться їх більше складна конструкція й підвищена вартість у порівнянні з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Крім того, для роботи синхронного двигуна потрібне пристрій для живлення постійним струмом обмотки збудження.

Досвід експлуатації показав, що застосування синхронних двигунів загального призначення найбільше доцільно при потужності 200 квт і більше в установках, не потребуючих частих пусків і регулювання частоти обертання (потужні насоси, вентилятори, компресори й т.п.).

Самостійна робота №28

Тема: Синхронний компенсатор.

Мета: ознайомитися із застосуванням СК та їх характеристиками.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Область застосування СК
- 2 Явища, які відбуваються при підключення СК
- 3 Характеристики СК

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Дайте визначення поняття СК.
- 2 Яка область застосування СК?
- 3 Зарисуйте схему ввімкнення СК в мережу.
- 4 Які явища відбуваються при підключенні СК?
- 5 За якими характеристиками обирають СК?

1 Область застосування СК

Синхронний компенсатор (СК) являє собою синхронну машину, призначену для генерування реактивної потужності. Синхронний компенсатор включають в електричну систему з метою підвищення її коефіцієнта потужності.

Принцип явищ, що відбуваються при цьому, полягає в тому, що необхідну для роботи деяких споживачів реактивну потужність виробляє не синхронний генератор, установлений на електростанції, а синхронний компенсатор, установлений у безпосередній близькості до споживача. До числа споживачів змінного струму, що вимагають значної реактивної потужності, у першу чергу ставляться асинхронні двигуни. На мал. 22.7 показана система, що складається із синхронного генератора (СГ), що підвищує Tp і знижує $TpII$ трансформаторів, лінії електропередачі (ЛЕП), споживача Z і синхронного компенсатора (СК), включеного безпосередньо на вході споживача. Синхронний компенсатор, включений у мережу, працює як синхронний двигун без навантаження ($P_2 = 0$), тобто в режимі х.х., і при виробляє реактивну потужність $Q_{ск}$, необхідну для роботи споживача Z , наприклад групи асинхронних двигунів. Завдяки цьому реактивна потужність у СГ і ЛЕП доведена до деякого мінімального значення Q_{min} . Це сприяє підвищенню техніко-економічних показників всієї електричної системи.

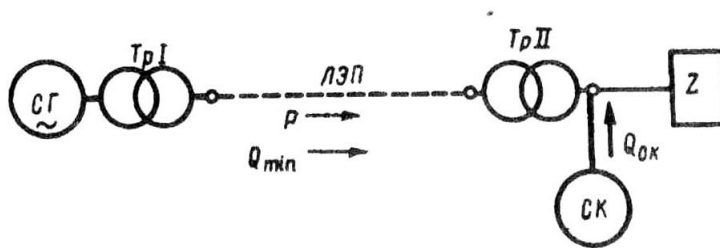


Рис. 22.7. Схема включення синхронного компенсатора (СК) в електричну систему

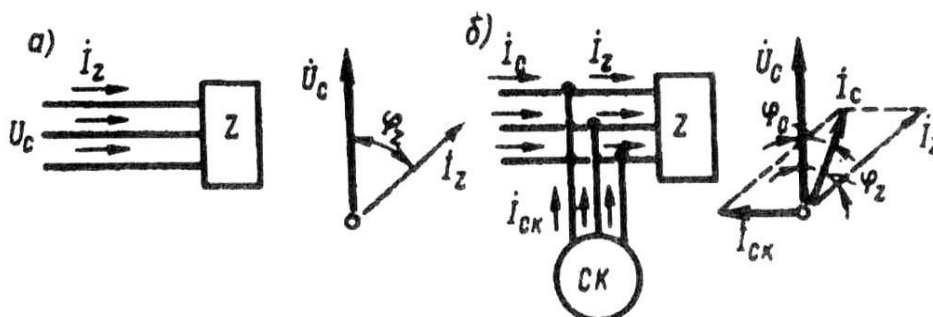


Рис. 22.8. Застосування синхронного компенсатора для підвищення коефіцієнта потужності мережі

2 Явища, які відбуваються при підключення СК

Для пояснення явищ, пов'язаних з підключенням СК до електричної системи, розглянемо мал. 22.8. При підключенні споживача Z до мережі з напругою U_c (мал. 22.8, *a*) у мережі виникає струм I_z , що відстає по фазі від напруги \dot{U}_c на кут φ_z , обумовлений значної індуктивної складового струму I_z . При підключенні СК паралельно споживачеві Z і створенні в СК режиму перепорушення (мал. 22.8, *б*) у мережі з'явиться струм $I_{СК}$, що випереджає по фазі напруга \dot{U}_c на кут 90° . Результуючий струм у мережі

$$\dot{I}_c = \dot{I}_z + \dot{I}_{СК} \quad (22.1)$$

Фазове зрушення цього струму щодо напруги мережі \dot{U}_c (кут φ_c) набагато менше кута фазового зрушення до включення СК (кут φ_z). Крім того, струм I_c стане менше ($I_c < I_z$). У цьому можна переконатися виходячи з наступних міркувань. Тому що СК працює без навантаження на валу, те його активна потужність не велика й визначається втратами х.х. у компенсаторі. Зневажаючи цими втратами, можна активну потужність у мережі до підключення СК

$$P_c = P_z = \sqrt{3} I_z U_c \cos \varphi_z \quad (22.2)$$

дорівняти до активної потужності мережі після підключення СК:

$$P'_c = \sqrt{3} I_c U_c \cos \varphi_c \quad (22.3)$$

Але тому що $P_c = P'_c$, а $\cos \varphi_c > \cos \varphi_z$, те $I_c < I_z$. У результаті синхронний генератор і лінія електропередачі розвантажуються, і втрати потужності в них зменшуються.

У деяких випадках СК працюють із недопорушенням. Необхідність у цьому виникає, якщо струм у системі містить значну ємнісну складову, що не компенсується індуктивної складового струму споживачів. Звичайно ступінь порушення СК регулюють за допомогою автоматичних пристроїв.

Синхронні компенсатори застосовують також для стабілізації напруги в мережі при передачі енергії по лініях великої довжини. При більших індуктивних навантаженнях напруга наприкінці лінії (у споживачів) виявляється набагато менше, ніж на початку; при малих навантаженнях, навпаки, під впливом ємнісних опорів лінії напруга наприкінці лінії може навіть підвищуватися в порівнянні з напругою на початку. Якщо ж наприкінці лінії (у споживачів) включити СК, що працює при більших навантаженнях з перепорушенням і при малих навантаженнях з недопорушенням, то це дозволить підтримувати напругу наприкінці лінії практично незмінним.

Умови нагрівання СК при випереджальному струмі (при перепорушенні) більше важкі, чим при відстаючому (при недопорушенні), тому номінальною потужністю компенсатора вважають потужність при перепорушенні.

Приклад 22.1. Споживач, включений у мережу змінного струму напругою $U_c = 6,3$ кв, споживає потужність 1500 кв·А при коефіцієнті потужності $\cos \varphi = 0,7$. Визначити потужність синхронного компенсатора, необхідного для підвищення коефіцієнта потужності в мережі до $\cos \varphi' = 0,95$ ($\sin \varphi' = 0,31$). Визначити також силу струму навантаження в мережі до й після компенсації.

Рішення. До включення СК реактивна потужність мережі $Q = S \sin \varphi = 1500 \cdot 0,7 = 1050$ кв·Ар, струм навантаження в мережі

$$I_c = S / (\sqrt{3} U_c) = 1500 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 138 \text{ A};$$

активна складова цього струму $I_{c,B} = I_c \cos \varphi = 138 \cdot 0,7 = 97 \text{ A}$.

Після включення СК реактивна потужність зменшилася до

$$Q' = S \sin \varphi' = 1500 \cdot 0,31 = 450 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}.$$

Таким чином, для підвищення коефіцієнта потужності установки від $\cos \varphi = 0,7$ до $\cos \varphi' = 0,95$ потрібно включити СК потужністю

$$Q_{c,K} = 1050 - 450 = 600 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}.$$

При цьому активна складова струму мережі не зміниться ($I_{c,K} = 97 \text{ A}$), а реактивна складова цього струму стане рівної

$$I'_{c,p} = Q' / (\sqrt{3} \cdot U_c) = 450 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 42 \text{ A}.$$

Отже, струм у мережі після включення СК

$$I'_c = \sqrt{I_{c,g}^2 + I_{c,p}^2} = \sqrt{97^2 + 42^2} = 104 \text{ A}.$$

3 Характеристики СК

Звичайно коефіцієнт потужності збільшують до 0,92—0,95, тому що економія, одержувана від підвищення коефіцієнта потужності до одиниці, не виправдує витрат, що збільшуються, обумовленою зростаючою потужністю синхронного компенсатора. Так, якщо в розглянутому прикладі треба було б збільшити коефіцієнт потужності в мережі до одиниці, то довелося б застосувати синхронний компенсатор потужністю 1050 кВ·Ар, тобто майже у два рази більше, ніж при $\cos \varphi' = 0,95$.

Синхронні компенсатори — це електричні машини великої потужності: від 10 до 160 тис. кВ·А. Виконують їх звичайно з горизонтальним розташуванням вала на напругу від 6,6 до 16 кВ, частотою 50 Гц. Число полюсів у СК звичайно становить $2p = 6$ й 8, що відповідає частоті обертання ротора 1000 й 750 про/хв. У синхронних компенсаторах сучасних серій застосований асинхронний пуск, тому ротор СК постачений пусковою кліткою.

Вал компенсатора не передає обертаючого моменту, і тому при його розрахунку враховують лише силу ваги ротора й силу магнітного притягання. У підсумку вал СК у порівнянні з валом синхронного двигуна має зменшений перетин. Це сприяє зменшенню габаритів і полегшенню СК. Тому що вал СК не має виступаючого кінця, то СК порівняно легко герметизировать із метою застосування в ньому водневого охолодження (див. § 19.3).

Найбільш важливими характеристиками СК є U-образні характеристики, що визначають основні параметри компенсатора: значення струмів в обмотці статора й в обмотці збудження. У принципі ці характеристики не відрізняються від U-образної характеристики синхронного двигуна в режимі х.х. ($P_2 = 0$). Зазначені характеристики будують для різних напруг мережі.

Синхронний компенсатор не несе активного навантаження (його електромагнітна потужність $P_{эм} \approx 0$) і працює при значенні кута $\theta = 0$, що забезпечує СК більшу перевантажувальну здатність.

Самостійна робота №29

Тема: СМ з постійними магнітами.

Мета: ознайомитися з принципом дії та будовою СМ з постійними магнітами.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Синхронні магнітоелектричні двигуни
- 2 Синхронні магнітоелектричні генератори

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Опишіть будову синхронного магнітоелектричного двигуна.
- 2 Опишіть принцип дії синхронного магнітоелектричного двигуна.
- 3 Побудуйте графіки асинхронних моментів магнітоелектричних СД.
- 4 Які переваги та недоліки магнітоелектричних СД?
- 5 Опишіть будову магнітоелектричних синхронних генераторів.

1 Синхронні магнітоелектричні двигуни

Синхронні машини з постійними магнітами (магнітоелектричні) не мають обмотки збудження на роторі, а збудливий магнітний потік у них створюється постійними магнітами, розташованими на роторі. Статор цих машин звичайної конструкції із двох- або трифазною обмоткою.

Застосовують ці машини найчастіше як двигуни невеликої потужності. Синхронні генератори з постійними магнітами застосовують рідше, головним чином як автономно працюючі генератори підвищеної частоти, малої й середньої потужності.

Синхронні магнітоелектричні двигуни. Ці двигуни одержали поширення у двох конструктивних виконаннях: з радіальним й аксіальним розташуванням постійних магнітів.

При *радіальному розташуванні* постійних магнітів пакет ротора з пусковою кліткою, виконаний у вигляді порожнього циліндра, закріплюють на зовнішній поверхні явно виражених полюсів постійного магніту 3. У циліндрі роблять межполюсные прорізи, що запобігають замикання потоку постійного магніту в цьому циліндрі (мал. 23.1, а).

При *аксіальному розташуванні* магнітів конструкція ротора аналогічна конструкції ротора асинхронного короткозамкненого двигуна. До торців цього ротора притиснуті кільцеві постійні магніти (мал. 23.1, б).

Конструкції з аксіальним розташуванням магніту застосовують у двигунах малого діаметра потужністю до 100 Вт; конструкції з радіальним розташуванням магнітів застосовують у двигунах більшого діаметра потужністю до 500 Вт і більше.

Фізичні процеси, що протікають при асинхронному пуску цих двигунів, мають деяку особливість, обумовлену тим, що магнітоелектричні двигуни пускають у збудженому стані. Поле постійного магніту в процесі розгону ротора наводить в обмотці статора ЕДС E_{in} , частота якої збільшується пропорційно частоті обертання ротора. Ця ЕДС наводить в обмотці статора струм, взаємодіючий з полем постійних магнітів і гальмовий момент, що M_T створює, спрямований зустрічно обертанню ротора.

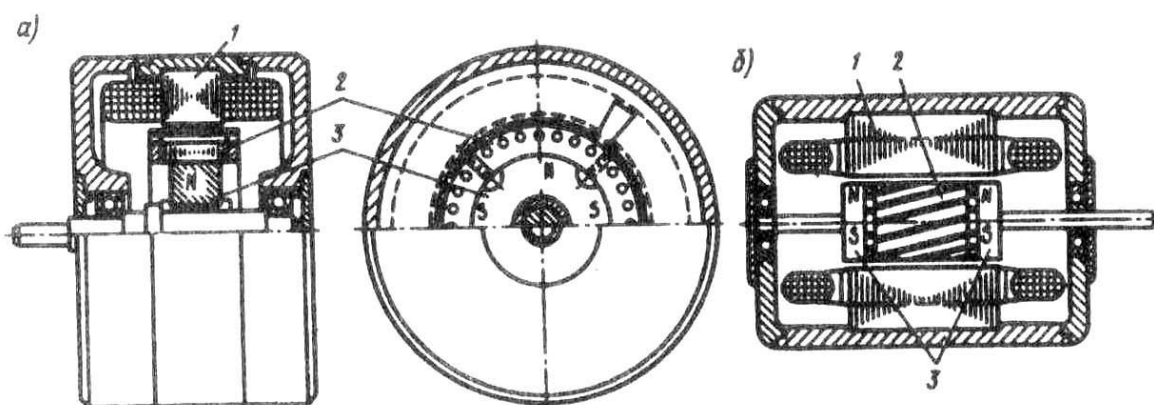


Рис. 23.1. Магнітоелектричні синхронні двигуни з радіальним (а) і аксіальним (б) розташуванням постійних магнітів:
1 — статор, 2 — короткозамкнений ротор, 3 — постійний магніт

Таким чином, при розгоні двигуна з постійними магнітами на його ротор діють два асинхронних моменти (мал. 23.2): обертаючий M_a (від струму I_1 , що

надходить в обмотку статора з мережі) і гальмовий M_T (від струму I_{1n} , наведеного в обмотці статора полем постійного магніту).

Однак залежність цих моментів від частоти обертання ротора (ковзання) різний: максимум обертаючого моменту M_a відповідає значній частоті (невеликому ковзанню), а максимум гальмового моменту M_T - малій частоті обертання (великому ковзанню). Розгін ротора відбувається під дією результуючого моменту $M_{рез} = M_a + M_T$, що має значний «провал» у зоні малих частот обертання. З наведених на малюнку кривих видно, що вплив моменту M_T на пускові властивості двигуна, зокрема на момент входу в синхронізм $M_{вх}$, значно.

Для забезпечення надійного пуску двигуна необхідно, щоб мінімальний результуючий момент в асинхронному режимі $M_{рез}$ й момент входу в синхронізм $M_{вх}$, були більше моменту навантаження. Форма кривої асинхронного моменту магнітоелектричного

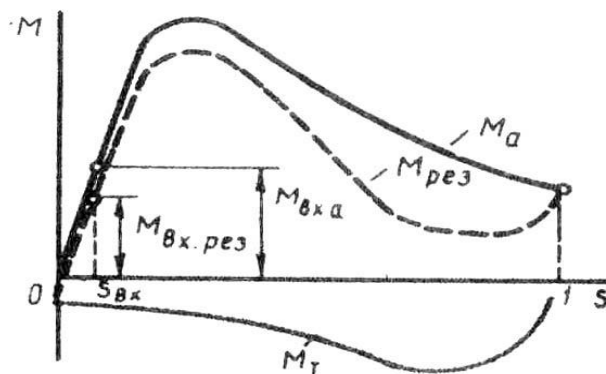


Рис.23.2. Графіки асинхронних моментів магнітоелектричного синхронного двигуна

двигуна в значній мірі залежить від активного опору пускової клітки й від ступеня збудженості двигуна, характеризуемой величиною $\xi_n = (E_0 / U_1) < 1$, де E_0 - ЕДС фази статора, наведена в режимі холостого ходу при обертанні ротора із синхронною частотою. Зі збільшенням ξ_n «провал» у кривій моменту $M_{рез}$ збільшується.

Електромагнітні процеси в магнітоелектричних синхронних двигунах у принципі аналогічні процесам у синхронних двигунах з електромагнітним порушенням. Однак необхідно мати у виді, що постійні магніти в магнітоелектричних машинах піддаються розмагнічуванню дією магнітного потоку реакції якоря. Пускова обмотка трохи послабляє це розмагнічування, тому що робить на постійні магніти дія, що екранує.

Позитивні властивості магнітоелектричних синхронних двигунів — підвищена стійкість роботи в синхронному режимі й рівномірність частоти обертання, а також здатність синфазного обертання декількох двигунів, включених в одну

мережу. Ці двигуни мають порівняно високі енергетичні показники (КПД й $\cos \varphi$,).

Недоліки магнітоелектричних синхронних двигунів - підвищена вартість у порівнянні із синхронними двигунами інших типів, обумовлена високою вартістю й складністю обробки постійних магнітів, виконуваних зі сплавів, що володіють великою коерцитивною силою (ални, алніко, магніко й ін.). Ці двигуни звичайно виготовляють на невеликі потужності й застосовують у приладобудуванні й у пристроях автоматики для привода механізмів, що вимагають сталості частоти обертання.

2 Синхронні магнітоелектричні генератори

Ротор такого генератора виконують при малій потужності у вигляді «зірочки» (мал. 23.3, а), при середній потужності — з когтеобразними полюсами й циліндричним постійним магнітом (мал. 23.3, б). Ротор з когтеобразними полюсами дає можливість одержати генератор з розсіюванням полюсів, що обмежують ударний струм при раптовому короткому замиканні генератора. Цей струм становить більшу небезпеку для постійного магніту через сильне дії, що розмагнічує.

Крім недоліків, відзначених при розгляді магнітоелектричних синхронних двигунів, генератори з постійними магнітами мають ще один недолік, обумовлений відсутністю обмотки збудження, а тому регулювання напруги в магнітоелектричних генераторах практично неможливі. Це утрудняє стабілізацію напруги генератора при змінах навантаження.

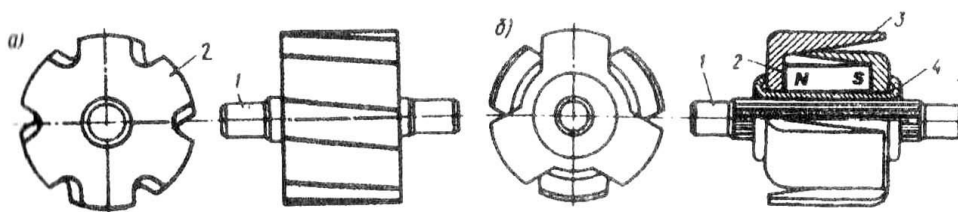


Рис.23.3. Ротори магнітоелектричних синхронних генераторів:

1 – вал; 2 – постійний магніт; 3 – полюс; 4 – немагнітна втулка

Самостійна робота №30

Тема: Синхронні реактивні двигуни.

Мета: ознайомитися з принципом дії СРД.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Принцип дії СРД
- 2 Переваги та недоліки СРД

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 У чому полягає особливість СРД?
- 2 Опишіть принцип дії СРД.
- 3 Поясніть як виникає обертовий реактивний момент?
- 4 Які переваги та недоліки СРД?

1 Принцип дії СРД

Відмінна риса синхронних реактивних двигунів (СРД) - відсутність у них порушення з боку ротора. Основний магнітний потік у цьому двигуні створюється винятково за рахунок МДС обмотки статора. У двох- і в трифазних СРД ця МДС є обертовою.

Для з'ясування принципу дії СРД звернемося до вираження електромагнітного моменту явнопольсної синхронної машини [див. (21.10)], з якого треба, що якщо відключити обмотку збудження ($E_0 = 0$), то основна складова моменту стає рівної нулю й на ротор машини продовжує діяти лише реактивна складова моменту [див. (21.12)]

$$M_p = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Принцип дії СРД полягає в наступному. При включенні обмотки статора в мережу виникає обертове магнітне

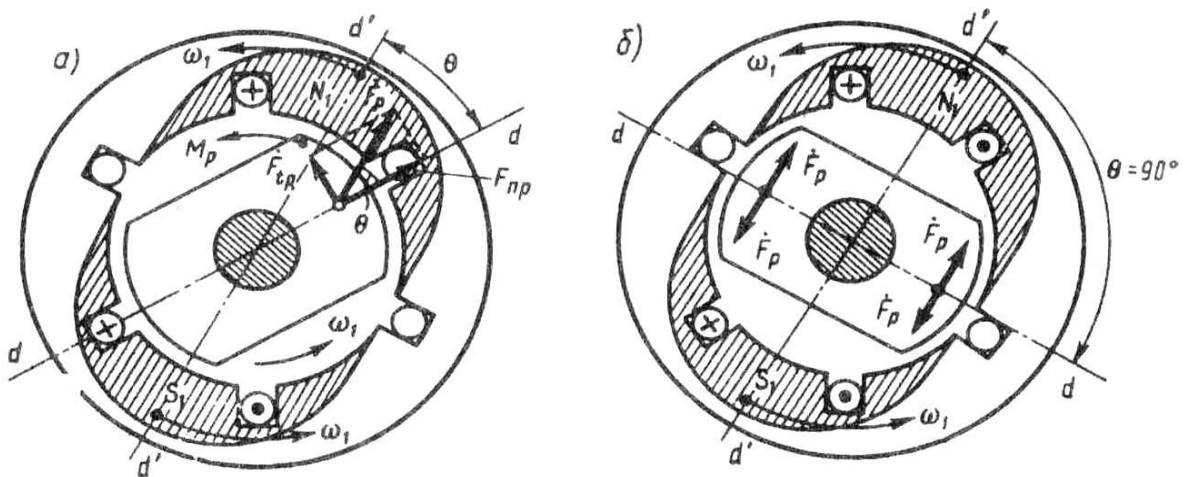


Рис.23.4. Принцип дії синхронного реактивного двигуна

поле. Як тільки вісь цього поля $d'-d'$ займе положення в просторі розточення статора, при якому вона буде зміщена щодо поздовжньої осі незбуджених полюсів ротора $d-d$ на кут θ убік обертання (мал. 23.4, а), між полюсами цього поля й виступаючих полюсів незбудженого ротора виникне реактивна сила магнітного притягання полюса ротора до полюса обертового поля статора F_p . Вектор цієї сили \vec{F}_p зміщений щодо поздовжньої осі ротора також на кут θ , тому сила F_p має дві складові: нормальну F_{np} , спрямовану по поздовжній осі ротора, і тангенціальну F_{tp} , спрямовану перпендикулярно поздовжньої осі полюсів ротора. Сукупність тангенціальних складових реактивних сил F_{tp} на всіх полюсах незбудженого ротора створить обертаючий реактивний момент M_p , що буде обертати ротор із синхронною частотою ω_1 . З ростом механічного навантаження на вал СРД кут θ збільшується й момент M_p росте.

Однак при значенні кута $\theta = 90^\circ$ реактивний момент $M_p = 0$. Така залежність моменту M_p від кута θ є принциповою для реактивного моменту, що відрізняє його від основної складової електромагнітного моменту $M_{осн}$ синхронного двигуна зі збудженим ротором (див. мал. 22.2, графік 1), що при $\theta=90^\circ$ має максимальне значення. З мал. 23.4, б видно, що при $\theta = 90^\circ$ реактивні сили магнітного притягання $F_{м.р}$, що діють на кожен полюс незбудженого ротора, взаємно врівноважуються й реактивний момент $M_p = 0$. Максимальне значення реактивного моменту $M_{p\max}$ настає при значенні кута $\theta = 45^\circ$. Тому залежність реактивного моменту M_p від кута θ визначається вираженням

$$M_p = M_{p\max} \sin 2\theta$$

(23.1)

Графічно ця залежність представлена кривій 2 на мал. 22.2. Неодмінна умова створення реактивного моменту M_p - явнополюсна конструкція ротора, тому що тільки в цьому випадку $x_q \neq x_d$.

2 Переваги та недоліки СРД

Потужність СРД і момент, що розвиває їм, менше, ніж у синхронного двигуна зі збудженими полюсами ротора. Порозумівається це тим, що в СРД через відсутність магнітного потоку ротора) ЕДС $E_0 = 0$, тому основна складова електромагнітного моменту

$M_{осн} = 0$ [см. (21.11)] й електромагнітний момент СРД визначається лише реактивної складової ($M = M_p$). Тому при однакових габаритах синхронного двигуна зі збудженими полюсами ротора й СРД потужність на валу й розвиває момент, що, у СРД набагато менше.

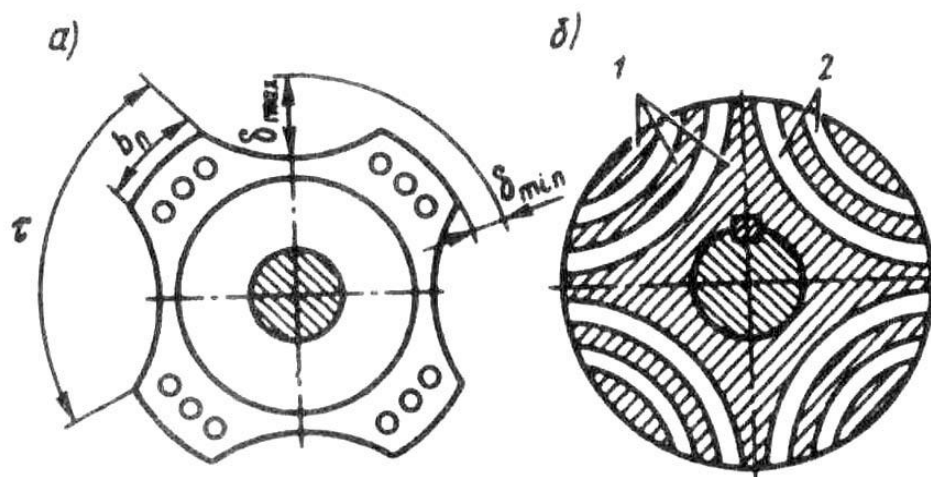


Рис. 23.5. Конструкція роторів синхронного реактивного двигуна

До недоліків СРД варто також віднести невисокі значення коефіцієнта потужності й КПД. Порозумівається це значним струмом, що намагнічує, статора, тому що порушення СРД відбувається за рахунок магнітного поля статора.

У СРД застосовують асинхронний пуск. Для цього ротор постачають короткозамкненою пусковою кліткою. На мал. 23.5, а показана традиційна конструкція ротора СРД, що відрізняється від ротора асинхронного двигуна

лише наявністю западин, що забезпечують ротору явнополюсну конструкцію. Чим більше ці западини, тим більше відношення x_d/x_q , а отже, і реактивний момент M_r . Однак зі збільшенням западин росте середня величина повітряного зазору, що веде до підвищення струму, що намагнічує, статора, а отже, до зниження енергетичних показників двигуна - коефіцієнта потужності й КПД. Крім того, зі збільшенням западин скорочуються розміри пускової клітки, що веде до зменшення асинхронного моменту, тобто до зменшення пускового моменту й моменту входу в синхронізм.

Наилучшие результати дає наступне співвідношення розмірів ротора:

$$b_n / \tau = 0,5 \div 0,6 \text{ и } \delta_{\max} / \delta_{\min} = 10 \div 12$$

У цьому випадку вдається домогтися відношення $x_d/x_q \approx 2$.

Більше досконала секціонированная конструкція ротора СРД, що представляє собою циліндр, у якому сталеві смуги 2 залиті алюмінієм 1 (мал. 23.5 б). Така конструкція ротора дозволяє одержати відношення $x_d/x_q \approx 4 \div 5$. За рахунок цього істотно зростає момент $M_{r\max}$ при збереженні струму, що намагнічує, на припустимому рівні.

На торцях секціонированного ротора є відлиті з алюмінію кільця, що замикають алюмінієві прошарки ротора, образуя короткозамкнену пускову клітку. Простота конструкції й висока експлуатаційна надійність забезпечили СРД малої потужності широке застосування й пристроях автоматики для привода самописних приладів, і пристроях звуко- і відеозаписі й інших установках, що вимагає строгої сталості частоти обертання.

Самостійна робота №31

Тема: Гістерезисні двигуни.

Мета: ознайомитися з особливістю принципу дії гістерезисних двигунів з їх перевагами та недоліками.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Принцип дії гістерезисного двигуна
- 2 Втрати, що виникають в гістерезисному двигуні
- 3 Переваги та недоліки гістерезисних двигунів

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 На чому заснована робота гістерезисного двигуна?
- 2 Поясніть явище магнітного запізнювання.
- 3 Які втрати виникають в гістерезисному двигуні?
- 4 Побудуйте механічні характеристики гістерезисного двигуна.
- 5 Які переваги та недоліки гістерезисного двигуна?

1 Принцип дії гістерезисного двигуна

Робота гістерезисного двигуна заснована на дії гістерезисного моменту. На мал. 23.6, а показані два полюси постійного магніту (поле статора); між ними розташований циліндр (ротор) з магнітно-твердого матеріалу. Під дією зовнішнього магнітного поля ротор намагнічується. На стороні зверненої до північного полюса постійного магніту, збуджується південний полюс, а на стороні ротора, зверненої до південного полюса постійного магніту, - північний полюс. На ротор починають діяти сили F_m , спрямовані радіально до його поверхні. Якщо полюси постійного магніту обертати навколо ротора, то внаслідок явища *магнітного запізнювання (гістерезису)* активна частина ротора не буде перемагнічуватися одночасно зі зміною напрямку обертowego магнітного поля й між віссю поля ротора й віссю зовнішнього поля з'явиться кут γ .

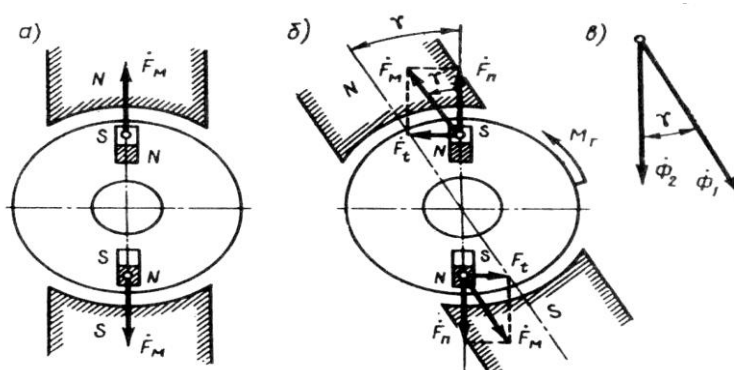


Рис. 23.6. До поняття про гістерезисний момент

Сили F_m , що діють на ротор, також змінять свій напрямок на кут γ , а тангенціальних складових цих сил F_t , створять гістерезисний момент M_2 (мал. 23.6, б).

Явище *магнітного запізнювання* полягає в тім, що частки феромагнітного матеріалу (поміщеного в зовнішнє магнітне поле), що представляють собою елементарні магніти, прагнуть орієнтуватися відповідно до напрямку зовнішнього поля. Якщо зовнішнє поле змінить свій напрямок, то елементарні частки міняють свою орієнтацію. Однак повороту елементарних часток перешкоджають у магнітно-твердих матеріалах внутрішні сили молекулярного тертя. Для зміни напрямку цих часток необхідна певна МДС, внаслідок чого перемагнічування ротора трохи відстає від зміни напрямку зовнішнього поля. Це відставання (магнітне запізнювання) характеризується кутом гістерезисного зрушення γ між вектором магнітного потоку ротора Φ_2 й вектором магнітного потоку обмотки статора Φ_1 , (мал. 23.6, в). Цей кут залежить винятково від магнітних властивостей матеріалу ротора.

2 Втрати, що виникають в гістерезисному двигуні

На подолання сил молекулярного тертя витрачається частина подводимої потужності, що становить *втрати на гістерезис*. Величина цих втрат залежить від частоти перемагнічування ротора $f_2 = f_1 s$, а отже, від ковзання:

$$P_z = s P_{z,k}$$

(23.2)

де $P_{z,k}$ — втрати на гістерезис при нерухомому роторі (при $s=1$),

т. е. у режимі к. з.

Тому що електромагнітна потужність, передана ротору, дорівнює втратам у роторі, діленим на ковзання [див. (13.5)]:

$$P_{эм} = P_z / s = P_{z,k},$$

(23-3)

а обертаючий момент - електромагнітної потужності, діленої на синхронну кутову швидкість:

$$M_z = P_{эм} / \omega_1 = P_{z,k} / \omega_1 \quad (23.4)$$

те, мабуть, величина гістерезисного моменту не залежить від частоти обертання ротора (ковзання). Графік $M_z = f(s)$ являє собою пряму, паралельну осі абсцис (мал. 23.7).

Кут гістерезисного зрушення залежить від ширини петлі гістерезису: чим ширше петля гістерезису магнітного матеріалу, тим більше кут гістерезисного зрушення. На мал. 23.8, а представлені дві петлі гістерезису: звичайної сталі (крива 2) і сплави викаллой (крива 1).

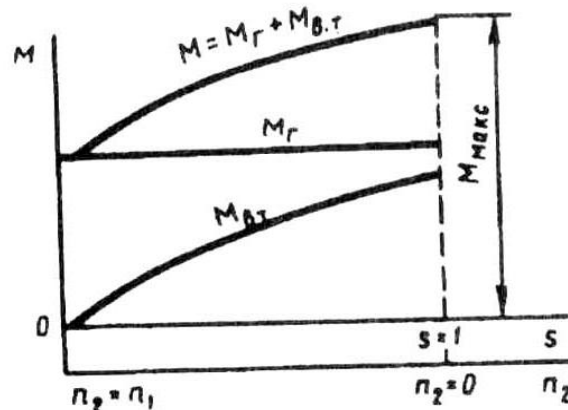


Рис. 23.7. Механічні характеристики гістерезисного двигуна

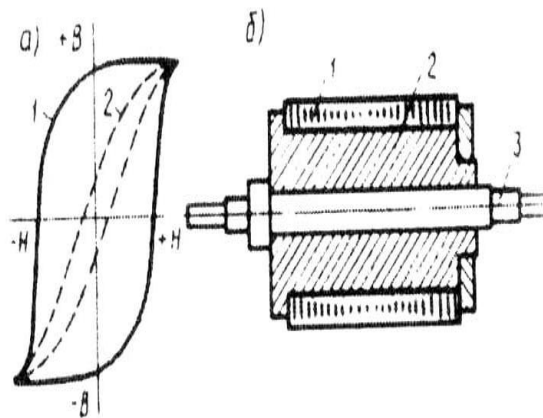


Рис. 23.8. Петлі гістерезису звичайної електротехнічної сталі і сплаву викаллою (а) і пристрій збірний ротор; гістерезисного двигуна (б)

Застосування звичайної сталі для виготовлення ротора не забезпечує гістерезисного моменту достатньої величини. Тільки магнітно-тверді матеріали, наприклад такі, як викаллою, дають можливість одержати великий гістерезисний момент. Ротори гістерезисних двигунів звичайно роблять збірними. Магнітно-тверда частина виконується у вигляді шихтованого або масивного кільця 1, розміщеного на втулці 2 (мал. 23.8, б). Остання жорстко посаджена на вал 3.

У машинах з нешихтованим (масивним) ротором обертове поле статора наводить у роторі вихрові струми. У результат взаємодії цих струмів з полем статора виникає електромагнітний момент $M_{БТ}$, значення якого пропорційно ковзанню:

$$M_{БТ} = sP_{БТ.К} / \omega_1 \quad (23.5)$$

де $P_{БТ.К}$ — втрати на вихрові струми в роторі при $s = 1$, тобто в режимі к. з., Вт; ω_1 , — кутова синхронна швидкість, радий/с.

Найбільшого значення момент $M_{БТ}$ досягає при нерухомому роторі ($s = 1$), тобто в момент пуску електродвигуна. Потім у міру зростання частоти обертання (зменшенні ковзання) момент $M_{БТ}$ убуває (див. мал. 23.7), при синхронній частоті він стає рівним нулю.

Таким образом, електромагнітний обертаючий момент гістерезисного двигуна створюється спільною дією моментів від вихрових струмів $M_{БТ}$ і гістерезисного $M_г$:

$$M = M_{БТ} + M_г = sP_{БТ.К} / \omega_1 + P_{г.к} / \omega_1 \quad (23.6)$$

На мал. 23.7 представлена залежність результуючого моменту гістерезисного двигуна від ковзання: $M = f(s)$. Характер цієї кривої залежить від співвідношення моментів $M_{B.T}$ і M_2 .

3 Переваги та недоліки гістерезисних двигунів

Гістерезисний двигун може працювати із синхронною й асинхронною частотами обертання. Однак робота двигуна в асинхронному режимі неекономічна, тому що зв'язано зі значними втратами на перемагнічування ротора, величина яких зростає зі збільшенням ковзання.

Достоїнства гістерезисних двигунів — простота конструкції, безшумність і надійність у роботі, великий пусковий момент, плавність входу в синхронізм, порівняно високий КПД, мала зміна кратності струму від пуску до номінального навантаження ($I_n / I_{н.м} = 1,3 - 1,4$).

Недоліки гістерезисних двигунів — низький коефіцієнт потужності ($\cos \varphi = 0,4 - 0,5$) і порівняно висока вартість. Крім того, при різких коливаннях навантаження гістерезисні двигуни схильні до хитань, що створює нерівномірність ходу (обертання). Порозумівається це відсутністю в гістерезисних двигунів пускової клітки, що при різких змінах навантаження робить на ротор заспокійливе (демпфирующее) дія. Найбільш сильні хитання спостерігаються в шихтованого ротора, у якому вихрові струми сильно обмежені. Викликувана хитаннями нерівномірність обертання обмежує області застосування гістерезисних двигунів.

Самостійна робота №32

Тема: Крокові двигуни.

Мета: ознайомитися з принципом дії крокових двигунів та з їх основними параметрами.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Принцип дії крокових двигунів
- 2 Параметри крокових двигунів

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Опишіть принцип дії крокових двигунів.
- 2 Які є види крокових двигунів?
- 3 За якими параметрами обирають крокові двигуни?
- 4 Чим визначається швидкодія крокових двигунів?

1 Принцип дії крокових двигунів

Крокові (імпульсні) двигуни (ШД) використовують звичайно як виконавчі двигуни, що перетворюють електричні сигнали (імпульси напруги) у кутового або лінійного дискретні (стрибкоподібні) переміщення (кроки). Найбільше застосування ШД одержали в електроприводах із програмним керуванням.

Розрізняють крокові двигуни з активним (збудженим) і реактивним ротором. Крокові двигуни з активним ротором мають обмотку збудження або виконані з постійними магнітами на роторі; крокові двигуни з реактивним ротором не мають обмотки збудження, а їхній ротор виконують із магнітно-м'якого матеріалу. Обмотку керування ШД звичайно розташовують на статорі й роблять одне- або багатозазною (частіше трьох- або чотирьохзазною).

Розглянемо принцип дії крокового двигуна на прикладі реактивного трьохзазною ШД, статор якого має шість явно виражених полюсів (по двох полюса на фазу), а ротор - два полюси (мал. 23.9).

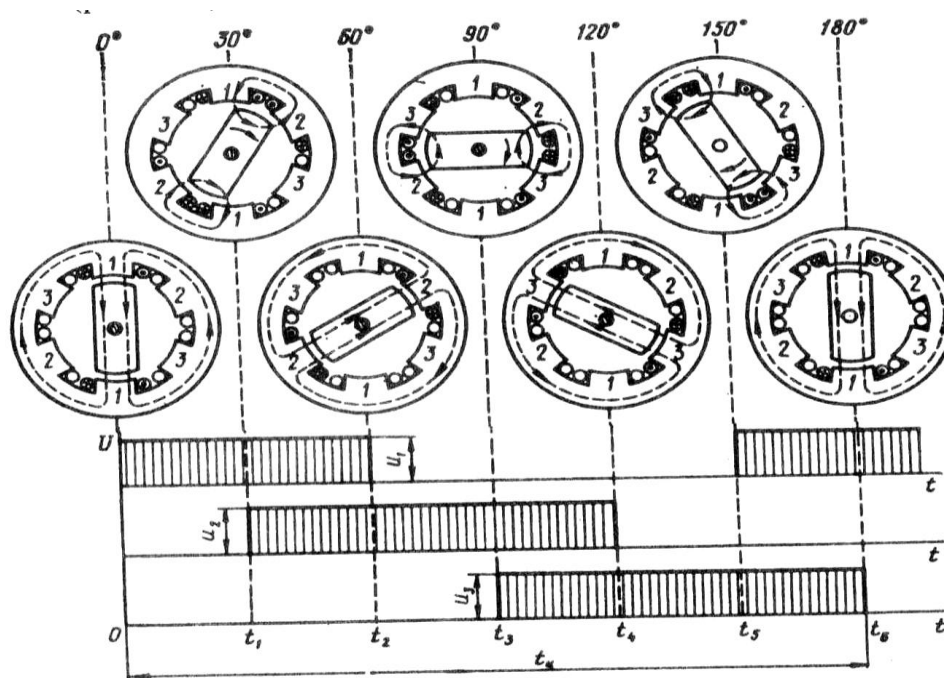


Рис 23.9. Принцип дії реактивного крокового двигуна

При проходженні імпульсу струму у фазі 1 обмотки керування ротор займає положення, що відповідає дії електромагнітних сил, тобто по осі полюсів 1—1. У момент часу t_1 з'явиться імпульс струму у фазі 2. При цьому на ротор будуть діяти сили, обумовлені одночасним впливом двох МДС (полюсів 1—1 й 2—2). У результаті ротор повернеться по годинній стрілці й займе положення, проміжне між полюсами 1—1 до 2—2, тобто повернеться на крок $\alpha_u = 30^\circ$. У момент t_2 імпульс струму у фазі 1 припиниться й ротор, зробивши крок $\alpha_u = 30^\circ$, займе положення по осі

полюсів 2—2. У момент t_3 з'явиться імпульс струму у фазі 3 і ротор, повернувшись ще на 30° , займе положення між полюсами статора 2—2 й 3—3. У моменти часу t_4, t_5 й t_6 ротор також буде робити кроки по 30° і наприкінці циклу (момент t_6) займе положення по осі полюсів статора 1—1, зробивши за цей цикл поворот на 180° .

У последующие цикли процеси в ШД будуть повторюватися. Таким чином, розглянутий реактивний трифазний ШД працює по шеститактної схемі комутації з роздільно-спільним включенням фазних обмоток керування: $1 \rightarrow 12 \rightarrow 2 \rightarrow 23 \rightarrow 3 \rightarrow 31 \rightarrow \dots$.

Працюють реактивні ШД від однополярних імпульсів напруги, тому що зміна полярності цих імпульсів не змінює напрямки реактивного моменту. Для зміни напрямку обертання ротора розглянутого ШД необхідно змінити схему комутації обмоток, наприклад $1 \rightarrow 13 \rightarrow 3 \rightarrow 32 \rightarrow 2 \rightarrow 21 \dots$

Якщо в цьому двигуні застосувати роздільне включення обмоток, тобто прийняти схему комутації $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots$, те крок двигуна $\alpha_u = 60^\circ$.

Шаг двигуна (град)

$$\alpha_u = 360^\circ / (2p_2 m_y k), \quad (23.7)$$

де $2p_2$ — число полюсних виступів на роторі; m_y — число фазних обмоток керування, просторово зміщених відносно один одного; k - коефіцієнт, обумовлений способом включення фазних обмоток керування (при роздільному включенні $k = 1$, при роздільно-спільному — $k = 2$).

Зменшення кроку α_u сприяє підвищенню стійкості й точності роботи ШД. Для зменшення кроку α_u збільшують число полюсних виступів на роторі $2p_2$. Так, якщо в розглянутому двигуні застосувати ротор хрестоподібного перетину ($2p_2 = 4$), те при шеститактної комутації крок $\alpha_u = 15^\circ$.

Крокові двигуни з активним ротором (з обмоткою збудження або постійних магнітів на роторі) дозволяють одержати, більші значення обертаючого моменту, а також забезпечують фіксацію ротора при відсутності керуючого сигналу.

2 Параметри крокових двигунів

Один з важливих параметрів ШД — частота приемистости - максимальна частота проходження керуючих імпульсів, при якій ротор втягується в синхронізм із місця без втрати кроку. У крокових двигунів реактивного типу частота приемистости при номінальному навантаженні досягає 1000 — 1300 Гц. Зі збільшенням кроку частота приемистости зменшується. Кроковий двигун працює в комплекті з комутатором — пристроєм, що перетворює задану послідовність керуючих імпульсів в m -фазну систему прямокутних імпульсів напруги.

При розгляданні принципу роботи крокового двигуна вплив навантажувального моменту на валу двигуна не враховувалося. Якщо ж на вал крокового двигуна діє навантажувальний момент M_n , то при

перемиканні керуючого імпульсу з однієї фази на іншу МДС статора повернеться на кут α_u , а ротор двигуна, повертаючись за вектором МДС, буде відставати від нього на кут $\Delta\theta_c$ називаний *кутом статичної помилки* крокового двигуна, ел. град:

$$\Delta\theta_c = \arcsin(M_n / M_{\max})$$

де M_{\max} — максимальний статичний момент, що відповідає куту зсуву ротора щодо вектора МДС статора $\theta = 90$ ел. град.

Швидкодія крокових двигунів визначається швидкістю протікання електромагнітних процесів при перемиканні керуючих імпульсів напруги з однієї фази статора на іншу. Швидкість протікання цих процесів оцінюється електромагнітної постійної часу, з

$$T_s = L_\phi / r_\phi,$$

де L_ϕ — індуктивність обмотки однієї фази статора, Гн; r_ϕ - активний опір обмотки однієї фази статора, Ом.

Для підвищення швидкодії крокового двигуна в обмотки фаз статора послідовно включають резистори $R_{доб}$, тоді

$$T_s = L_\phi / (r_\phi + R_{доб})$$

Енергетичним показником крокового двигуна є значення споживаної потужності P_1 . Частота обертання крокового двигуна регулюється зміною частоти подачі керуючих імпульсів напруги на фази обмотки статора.

Самостійна робота №33

Тема: Синхронні машини з кігтевидними полюсами та електромеханічним збудженням.

Мета: ознайомитися з будовою та призначенням синхронних машин з кігтевидними полюсами.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Будова синхронного двигуна з кігтеподібними полюсами

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Яка область застосування СМ з кігтеподібними полюсами?
- 2 У чому полягає особливість конструкції ротора СМ з кігтеподібними полюсами?
- 3 Опишіть будову СМ з кігтеподібними полюсами.

1 Загальні поняття

Такі синхронні генератори широко застосовуються в автотракторному електроустаткуванні. На виході генератора включають напівпровідниковий випрямляч (мал. 23.10, *а*,) тому генератор виконує функцію джерела постійного струму. Ротор генератора має конструкцію, аналогічну мал. 23.3, *б*, відрізняючись наявністю обмотки збудження замість постійного магніту.

Когтеподібна конструкція ротора дозволяє збудити багатополісний ротор за допомогою однієї котушки порушення, що підключає до джерела постійного струму через контактні кільця й щітки. У такому роторі аксиально - спрямований магнітний потік порушення міняє свій напрямок у повітряному зазорі й стає радіально спрямованим (мал. 23.10, *б*).

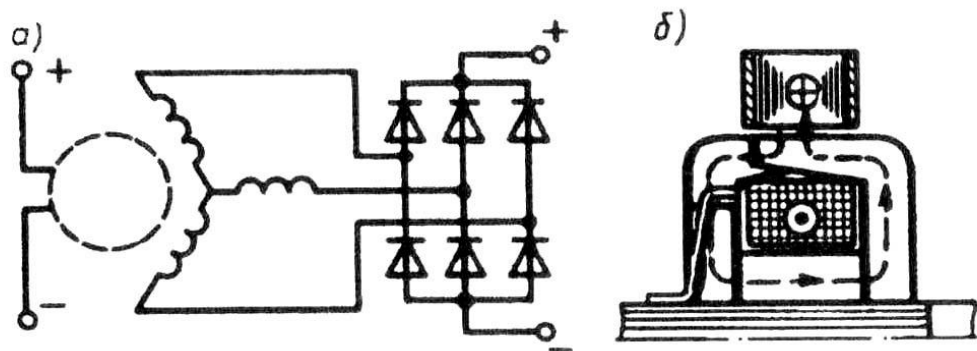


Рис.23.10. Принципова схема включення (*а*)

і магнітна система синхронного генератора (*б*) з когтеобразними полюсами

Розглянутий генератор відрізняється простотою конструкції, компактністю, надійністю й високою технологічністю. Останнє достоїнство має важливе значення в умовах масового виробництва синхронних генераторів з потужності (менш 1 кВа) У схемі електроустаткування генератор включають паралельно з акумуляторною батареєю, і він працює з нею в буферному режимі, тобто вони доповнюють один одного залежно від величини навантаження й частоти обертання приводного двигуна.

2 Будова синхронного двигуна з кігтеподібними полюсами

На мал. 23.11 показаний пристрій автомобільного синхронного генератора типу Г-250. Статор 8 цього генератора являє собою шихтований пакет, на 18 зубцях якого розташовані котушки 7, що утворюють трифазну обмотку, з'єднану зіркою. Ротор складається з вала, на який напесовані дві сталеві шайби з відігнутими когтеобразними полюсами 2 (по шести полюсів на кожній шайбі). На сталеву втулку 10 надета циліндрична котушка порушення 9, кінці якої приєднані до контактних кілець 5. На кільця

накладені мідно-графітові щітки 6. На задньому підшипниковому щиті 4 розташований випрямний блок із шести кремнієвих діодів 3, з'єднаних за мостовою схемою (див. рис 23.10, а). Підшипникові щити / й 4 і сердечник статора стягнуті трьома болтами. На валу генератора укріплений відцентровий вентилятор 11 і шків 12, за допомогою якого ротор генератора приводиться в обертання.

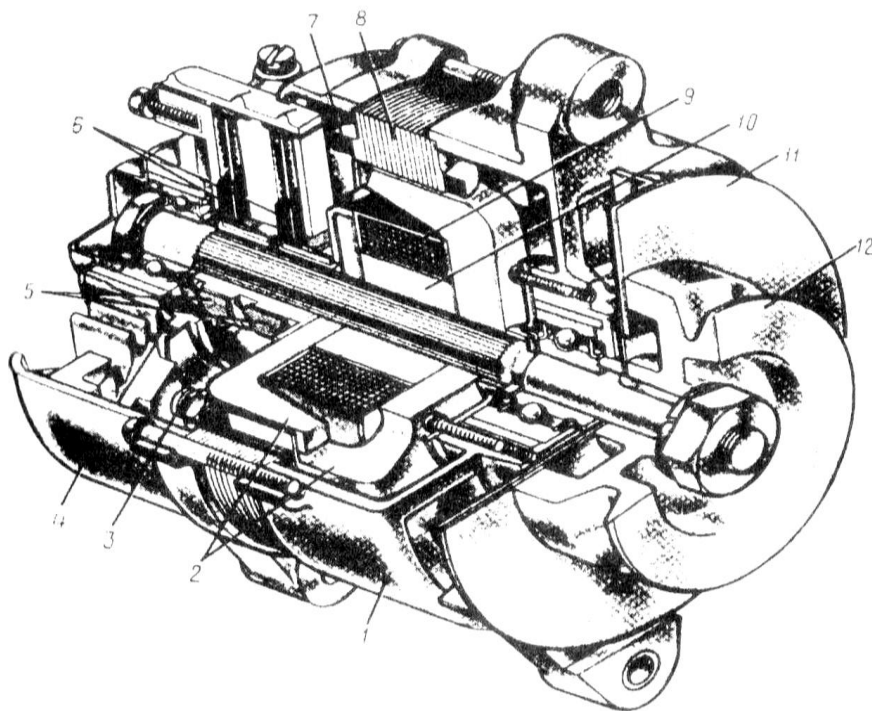


Рис.23.11. Пристрій синхронного генератора з когтеобразними полюсами

Самостійна робота №34

Тема: Індукторні синхронні машини.

Мета: ознайомитися з принципом дії та областю застосування індукторних генераторів.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Здвоєна конструкція індукторного генератора
- 3 Область застосування індукторних генераторів

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Яка область застосування індукторних генераторів?
- 2 Які є конструктивні схеми індукторних генераторів?
- 3 Опишіть принцип дії здвоєної конструкції індукторного генератора.
- 4 Яким чином в індукторних генераторах забезпечується сталий магнітний потік?
- 5 Чи володіють індукторні генератори принципом оборотності?

1 Загальні поняття

Деякі пристрої, наприклад установки індукційного нагрівання, гіроскопічні й радіолокаційні пристрої, вимагають для своєї роботи змінного струму підвищеної частоти, що виражає сотнями й навіть тисячами герц. Одержання таких змінних струмів за допомогою синхронних генераторів звичайної конструкції сполучено з непереборними труднощами, тому що пов'язане з необхідністю або збільшення частоти обертання понад 3000 про/хв, або надмірного збільшення числа полюсів, або одночасного застосування обох заходів. Однак збільшення частоти обертання веде до зростання відцентрових зусиль у роторі до небезпечних значень, а збільшення числа полюсів веде до такого зменшення полюсного розподілу τ , при якому розміщення обмотки на статорі стає практично неможливим.

Для одержання змінного струму підвищеної частоти (до 30 кгц) застосовують індукторні генератори, відмітною ознакою яких є те, що за один період магнітний потік у них не міняє свого знака, як у звичайних синхронних генераторах, а лише змінюється від Φ_{\max} до Φ_{\min} значень, тобто пульсує (мал. 23.12, *a*). Пульсуючий потік складається із двох складових: постійної Φ_{cp} й змінної $\Phi_{пер}$, що представляє собою періодично змінюється як за значенням, так і по напрямку магнітний потік з амплітудою $\Phi_{пер} = 0,5(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})$. Постійна складова потоку не наводить в обмотках ЕРС, а змінна складова, зчіплюючись із робочою обмоткою генератора, наводить у ній ЕРС.

2 Здвоєна конструкція індукторного генератора

Існує кілька конструктивних схем індукторних генераторів. Всі вони засновані на створенні пульсацій магнітного потоку за рахунок зміни провідності магнітного ланцюга, тобто за рахунок зубцових пульсацій магнітного потоку. Для цього статору й ротору генератора надають зубчасту структуру. Коли зубець ротора перебуває проти зубця статора, те магнітний потік у зубці статора здобуває найбільше значення, коли ж проти зубця статора розташований паз ротора, те магнітний потік у цьому зубці статора стає найменшим. При цьому частота змін змінного магнітного потоку, а отже, і частота ЕДС, наведеної в робочій обмотці цим потоком, пропорційні числу зубців ротора Z_2 :

$$f_1 = Z_2 n_2 / 60.$$

(23.8)

Розглянемо одну з конструкцій індукторного генератора, називану здвоєною (мал. 23.12, *б*). Статор 1 і ротор 5 генератора виконані здвоєними. Обмотка збудження 2, розташовувана на статорі, підключена до джерела постійного струму й створює магнітний потік,

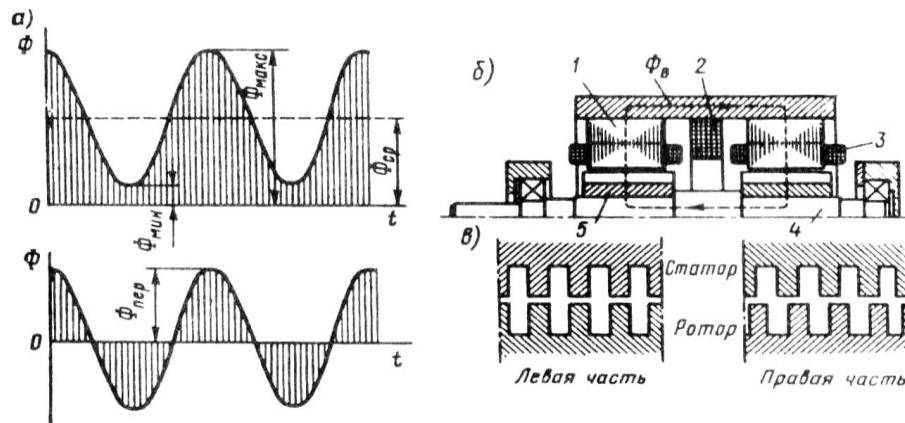


Рис. 23.12. Індукторний генератор зведеного типу:
 а — графік магнітного потоку; б — пристрій генератора;
 в — взаємне розташування зубців статора й ротора

закриваючийся уздовж вала ротора 4, при цьому на кожній частині статора (і ротора) збуджуються полюси однієї полярності. Число зубців на статорі й на роторі однаково. Пульсації магнітного потоку відбуваються за рахунок зсуву. 5 цов обертового ротора щодо зубців статора. На кожному зубці статора розташована котушка 3, у якій змінній складовій магнітного потоку наводиться ЕДС.

Досить важливим в індукторних генераторах є забезпечення сталості загального магнітного потоку при обертанні ротора, тому що в протилежному випадку в обмотці збудження 2 буде індукуватися ЕДС високої частоти. У розглянутому індукторному генераторі сталість загального магнітного потоку обмотки збудження забезпечується тим, що один пакет ротора зміщений щодо іншого пакета на половину зубцового розподілу (мал. 23.12, в). Завдяки цьому магнітний опір сумарному потоку порушення залишається незмінним при будь-якому положенні ротора. Це дозволило ротор генератора зробити сталевим монолітним (а не шихтованим) профрезерованими пазами.

Коефіцієнт корисної дії генераторів індукторного на трохи нижче, ніж у генераторів промислової частоти (50 Гц), через підвищені електричні втрати в обмотці статора, обумовлених ефектом витиснення струму, що викликає

збільшення активного опору обмотки. Відсутність обмоток на роторі дозволяє виключити в індукторному генераторі контактні кільця. Це спрощує конструкцію генератора й підвищує його надійність.

3 Область застосування індукторних генераторів

Генератори індукторного типу застосовуються як збудників турбогенераторів серії ТВВ (див. § 19.1). На мал. 23.13 показаний пристрій такого збудника - генератора індукторного типу потужністю 2700 кВА. На відміну від індукторного генератора зведеного типу (див. мал. 23.12) ротор

збудника має шихтовану конструкцію. Вентиляція генератора виконана по замкнутому циклі (див. § 31.4) із застосуванням газоохладителів.

Індукторна синхронна машина оборотна, тобто вона може працювати не тільки в генераторному, але й у руховому режимі. Індукторні синхронні двигуни дозволяють одержувати досить малі частоти обертання без застосування механічних редукторів. Синхронна частота обертання такого двигуна при частоті живлячої напруги f_1 , залежить від числа зубців Z_2 у сердечнику ротора: $n_1 = f_1 60 / Z_2$. Наприклад, при $f_1 = 50$ Гц й $Z_2 = 100$ одержимо $n_1 = 50 \cdot 60 / 100 = 30$ об/хв.

Для одержання обертового магнітного поля обмотку статора індукторного двигуна роблять або трифазної, або однофазної. В останньому випадку на статорі крім робочої розташовують ще й пускову обмотку, що включає в мережу через пусковий конденсатор.

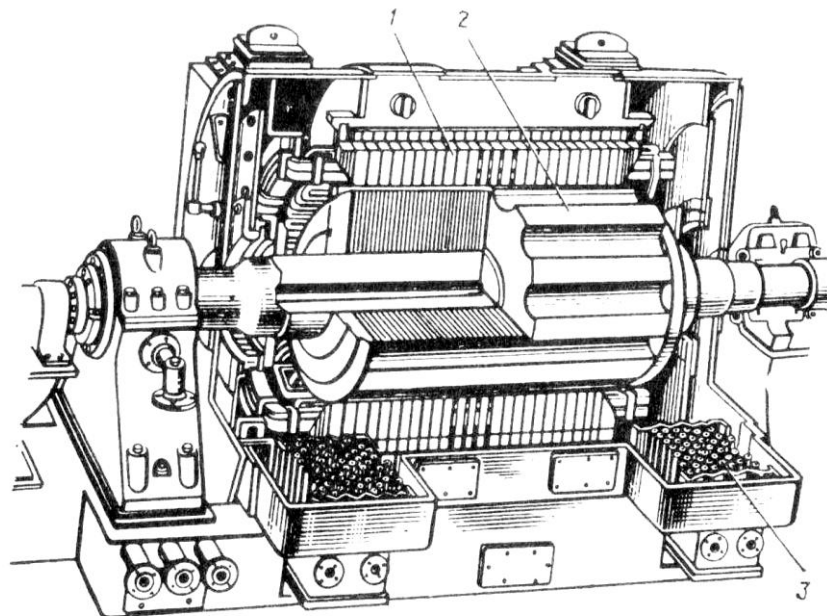


Рис. 23.13. Збудник індукторного типу потужністю 2700 кв(А)
1 — статор; 2 — ротор; 3 — газоохладитель

Самостійна робота №35

Тема: Будова і принцип дії колекторної машини.

Мета: ознайомитися з будовою та принципом дії колекторної машини.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Принцип дії генератора й двигуна постійного струму
- 2 Будова колекторної машини постійного струму

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Дайте визначення поняття колектор.
- 2 Опишіть принцип дії колекторного генератора постійного струму.
- 3 Опишіть принцип дії колекторного двигуна постійного струму.
- 4 Опишіть будову статора колекторної машини.
- 5 Опишіть будову якоря колекторної машини.

1 Принцип дії генератора й двигуна постійного струму

Характерною ознакою колекторних машин є наявність у них колектора - механічного перетворювача змінного струму в постійний і навпаки. Необхідність у такому перетворювачі порозумівається тим, що в обмотці якоря колекторної машини повинен протікати змінний струм, тому що тільки в цьому випадку в машині відбувається безперервний процес електромеханічного перетворення енергії.

Розглянемо принцип дії колекторного генератора постійного струму. На мал. 24.1 зображена спрощена модель такого генератора: між полюсами N й S постійного магніту перебуває обертова частина генератора — якір, вал якого за допомогою шківів й пасової передачі механічно пов'язаний із приводним двигуном (на малюнку не показаний) — джерелом механічної енергії. У двох поздовжніх пазах на сердечнику якоря розташована обмотка у вигляді одного витка a, b, c, d , кінці якого приєднані до двох мідних ізольованих друг від друга півкільць, що утворюють найпростіший колектор. На поверхню колектора накладені щітки A й B , що здійснюють ковзний контакт із колектором й єдиним генератором із зовнішнім ланцюгом, куди включене навантаження опором R .

Припустимо, що приводний двигун обертає якір генератора проти вартвої стрілки, тоді у витку на якорі, що обертається в магнітному полі постійного магніту, наводиться ЕРС, миттєве значення якої $e = 2Blv$, а напрямок для положення якоря, зображеного на малюнку, зазначено стрілками.

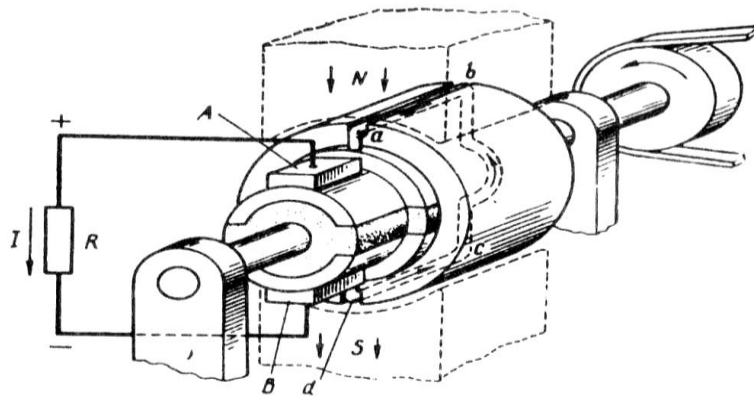


Рис. 24.1. Спрощена модель колекторної машини

У процесі роботи генератора якір обертається й виток a, b, c, d , займає різне просторове положення, тому в обмотці якоря наводиться змінна ЕДС. Якби в машині не було колектора, то струм у зовнішньому ланцюзі (у навантаженні R) був би змінним, але за допомогою колектора й щіток змінний струм обмотки якоря перетворюється в *пульсуючий* струм у зовнішньому ланцюзі генератора, тобто струм, незмінний по напрямку.

При положенні витка якоря, показаному на мал. 24.1, струм у зовнішньому ланцюзі (у навантаженні) спрямований від щітки A к щітці B ; отже, щітка A є позитивною, а щітка B -- негативною. Після повороту якоря на 180° (мал. 24.2, a) напрямок струму у витку якоря зміниться на зворотне, однак полярність щіток, а отже, і напрямок не струму в зовнішньому ланцюзі (у навантаженні) залишаться незмінними (мал. 24.2, b). Порозумівається це тим, що в той момент, коли струм у витку якоря міняє свій напрямок, відбувається зміна колекторних пластин під щітками. Таким чином, під щіткою A завжди перебуває пластина, з'єднана із провідником, розташованим під північним магнітним полюсом, а під щіткою B - пластина, з'єднана із провідником, розташованим під південним полюсом. Завдяки цьому полярність щіток генератора залишається незмінною незалежно від положення витка якоря. Що ж стосується пульсацій струму в зовнішньому ланцюзі, то вони набагато послабляться при збільшенні числа витків в обмотці якоря при їхньому рівномірному розподілі по поверхні якоря й відповідному збільшенні числа пластин у колекторі.

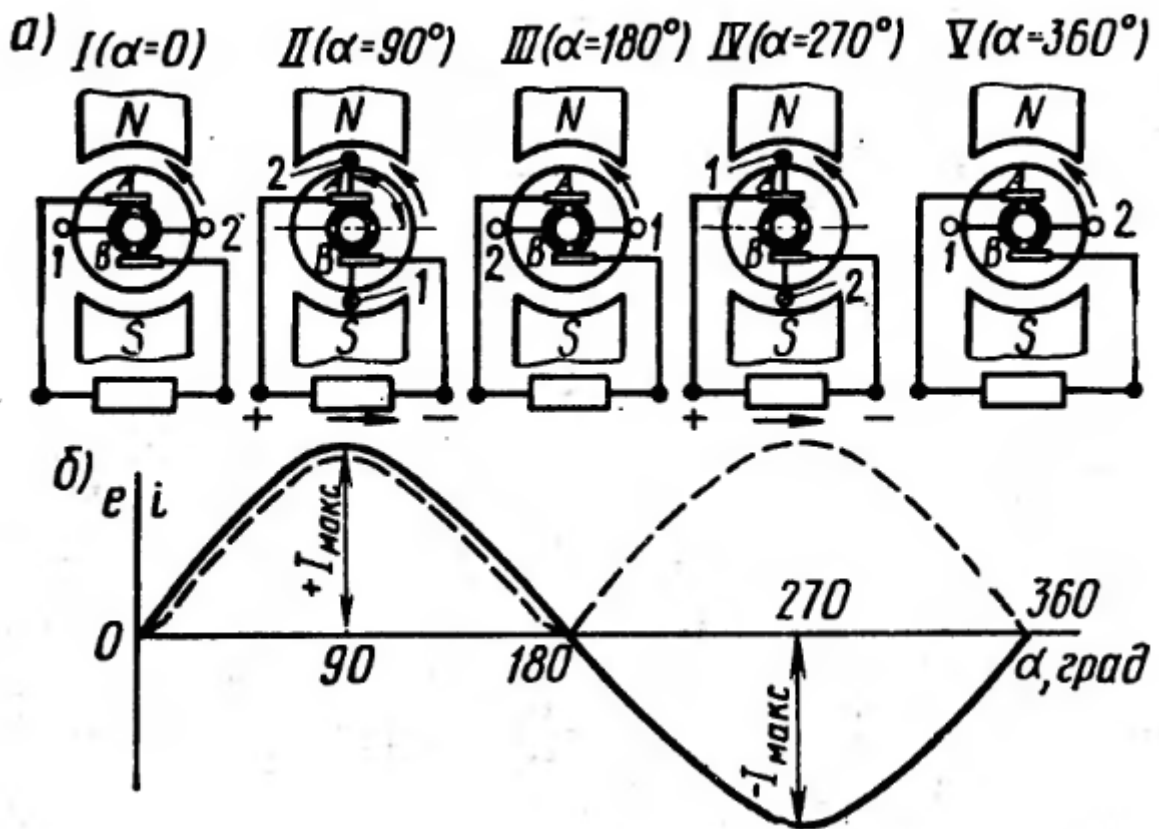


Рис. 24-2. До принципу дії генератора постійного струму:
 _____ ЭДС і струм в обмотці якоря;
 - - - - - ЭДС і струм у зовнішньому ланцюзі генератора

Відповідно до принципу оборотності електричних машин спрощена модель машини постійного струму може бути використаний як двигун постійного струму. Для цього необхідно відключити навантаження генератора R і

підвести до щіток машини напруга від джерела постійного струму. Наприклад, якщо до щітки *A* підключити затискач «плюс», а до щітки *B* «мінус», те в обмотці якоря з'явиться струм *I*, напрямок якого показане на мал. 24.3. У результаті взаємодії цього струму з магнітним полем постійного магніту (полем порушення) з'являться електромагнітні сили $F_{\text{ЭМ}}$, що створюють на якорі електромагнітний момент *M* и обертаючі його проти вартвий стрілки. Після повороту якоря на 180° електромагнітні сили не змінять свого напрямку, тому що одночасно з переходом кожного провідника

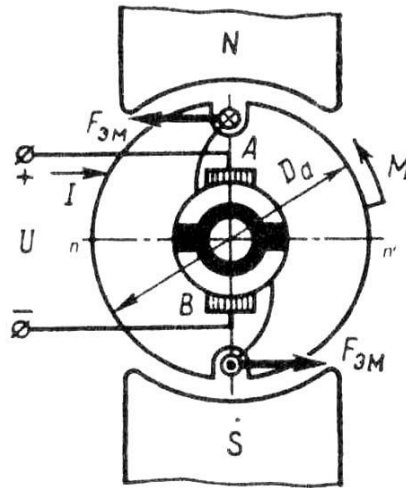


Рис. 24.3. До принципу дії двигуна постійного струму

обмотки якоря із зони одного магнітного полюса в зону іншого полюса в цих провідниках міняється напрямок струму.

Таким чином, призначення колектора й щіток у двигуні постійного струму - змінювати напрямок струму в провідниках обмотки якоря при їхньому переході із зони магнітного полюса однієї полярності в зону полюса іншої полярності.

Розглянута спрощена модель машини постійного струму не забезпечує двигуну усталеної роботи, тому що при проходженні провідниками обмотки якоря геометричної нейтралі *nm'* (мал. 24.3) електромагнітні сили $F_{\text{ЭМ}} = 0$ (магнітна індукція в середині міжсмужного простору дорівнює нулю). Однак зі збільшенням числа провідників в обмотці якоря (при рівномірному їхньому розподілі на поверхні якоря) і числа пластин колектора обертання якоря двигуна стає стійким і рівномірним.

2 Будова колекторної машини постійного струму

У цей час електромашиностроительные заводи виготовляють електричні машини постійного струму, призначені для роботи у всіляких галузях промисловості, тому окремі вузли цих машин можуть мати різну конструкцію, але загальна конструктивна схема машин однакова. Нерухома частина машини постійного струму називається статором,

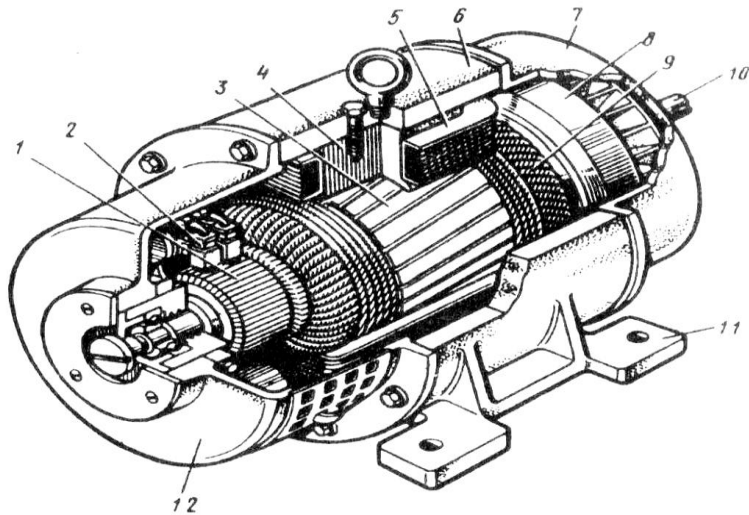


Рис. 24.4. Будова машини постійного струму

обертюва частина - якорем (мал. 24.4).

Статор. Складається зі станини 6 і головних полюсів 4. Станина 6 служить для кріплення полюсів і підшипникових щитів й є частиною магнітопровода, тому що через неї замикається магнітний потік машини. Станину виготовляють зі сталі — матеріалу, що володіє достатньою механічною міцністю й великою магнітною проникністю. У нижній частині станини є лабети 11 для кріплення машини до фундамента плити, а по окружності станини розташовані отвори для кріплення сердечників головних полюсів 4. Звичайно станину роблять цільною зі сталевий труби, або зварений з листовий сталі, за винятком машин з досить більшим зовнішнім діаметром, у яких станину роблять рознімною, що полегшує транспортування й монтаж машини.

Головні полюси призначені для створення в машині магнітного поля порушення. Головний полюс складається із сердечника 6 і полюсної котушки 5. З боку, зверненої до якоря, сердечник полюса має полюсний наконечник, що забезпечує необхідний розподіл магнітної індукції в зазорі машини. Сердечники головних полюсів роблять шихтованими з листовий конструкційної сталі товщиною 1-2 мм або з тонколистовий електротехнічної анізотропної холоднокатаної сталі, наприклад марки 3411. Штамповані пластини головних полюсів спеціально не ізолюють, тому що тонка плівка окисла на їхній поверхні достатня для значного ослаблення вихрових струмів, наведених у полюсних наконечниках пульсаціями магнітного потоку, викликаного зубчатістю сердечника якоря. Анізотропна сталь має підвищену магнітну проникність уздовж прокату, що повинне враховуватися при штампуванні пластин й їхній зборці в пакет. Знижена магнітна проникність поперек прокату сприяє ослабленню реакції якоря (див. § 26.2) і зменшенню потоку розсіювання головних і додаткових полюсів (див. § 26.1).

У машинах постійного струму невеликої потужності полюсні котушки роблять бескаркасними — намотуванням мідного обмотувального проведення безпосередньо на сердечник полюса, попередньо наклеївши на нього ізоляційну прокладку (мал. 24.5, а). У більшості машин (потужністю 1 квт і більше) полюсну котушку роблять каркасною: обмотувальне проведення намотують на каркас (звичайно пластмасовий), а потім надягають на сердечник полюса (мал. 24.5, б). У деяких конструкціях машин полюсну котушку для більше інтенсивного охолодження розділяють по висоті на частині, між якими залишають вентиляційні канали.

Якір. Якір машини постійного струму (мал. 24.4) складається з вала 10, сердечника 3 з обмоткою й колектора 7. Сердечник якоря має шихтовану конструкцію й набирається зі штампованих пластин тонколистової електротехнічної сталі. Аркуші покривають ізоляційним лаком, збирають у пакет і запікають. Готовий сердечник напрессовують на вал якоря. Така конструкція сердечника якоря дозволяє значно послабити в ньому вихрові струми, що виникають у результаті його перемагнічування в процесі обертання в магнітному полі. На поверхні сердечника якоря є поздовжні пази, у які укладають обмотку якоря.

Обмотку виконують мідним проведенням круглого або прямокутного перетину. Пази якоря після заповнення їхніми проводами обмотки звичайно закривають клинами (текстолітовими або гетинаксовими). У деяких машинах пази не закривають клинами, а накладають на поверхню якоря бандаж. Бандаж роблять із дроту або стеклоленты з попереднім натягом. Лобові частини 9 обмотки якоря кріплять до обмоткодержателям бандажем.

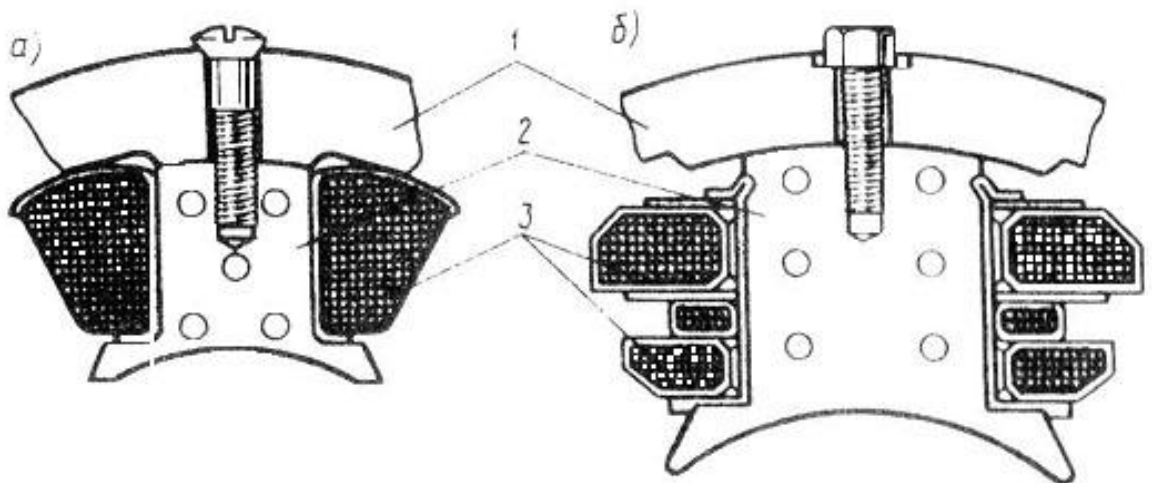


Рис. 24.5. Головні полюси з бескаркасною (а) і каркасною (б) полюсними котушками:

1—станина, 2—сердечник полюса, 3—полюсна котушка

Колектор 1 є одним зі складних вузлів машини постійного струму. Основними елементами колектора є пластини трапецеїдального перетину із твердотягнутою міді, зібрані таким чином, що колектор здобуває циліндричну форму. Залежно від способу закріплення колекторних пластин розрізняють два основних типи колекторів: зі сталевими конусними шайбами й на пластмасі. На мал. 24.6, а показаний пристрій колектора зі

сталевими конусними шайбами. Нижня частина колекторних пластин б має форму «ласточкина хвоста». Після зборки колектора ці частини пластин виявляються затиснутими між сталевими шайбами 1 й 3, ізольованими від мідних пластин миканитовими манжетами 4. Конусні шайби стягнуті гвинтами 2. Між мідними пластинами розташовані миканитові ізоляційні прокладки. У процесі роботи машини робоча поверхня колектора поступово стирається щітками. Щоб при цьому миканитові прокладки не виступали над робочою поверхнею колектора, що викликало б вібрацію щіток і порушення роботи машини, між колекторними пластинами фрезерують пази (доріжки) на глибину до 1,5 мм (мал. 24.6, б). Верхня частина 5 колекторних пластин (див. мал. 24.6, а), називана петушком, має вузький поздовжній паз, у який закладають провідники обмотки якоря й ретельно припаюють.

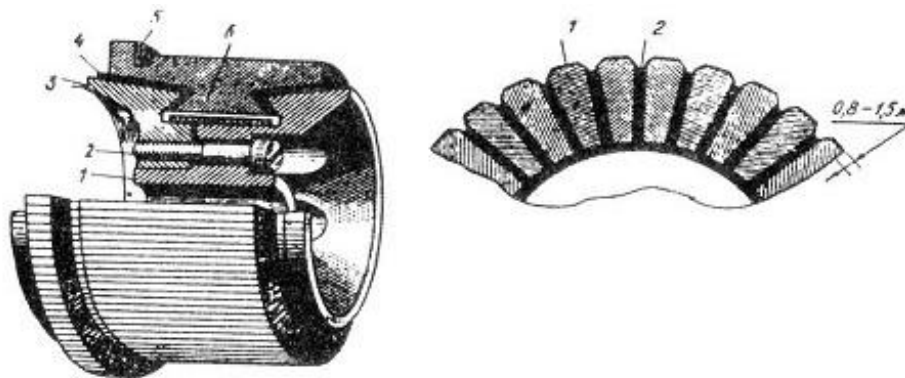


Рис. 24.6 Пристрій колектора з конусними шайбами

У машинах постійного струму малої потужності часто застосовують *колектори на пластмасі*, що відрізняються простотою у виготовленні. Набір мідних і миканитових пластин у такому колекторі втримується пластмасою, запресованої в простір між набором пластин і сталеву втулку 4 й утворюючий корпус колектора. Іноді з метою збільшення міцності колектора цю пластмасу 2 армують сталевими кільцями 3 (мал. 24.7). У цьому випадку миканитові прокладки повинні мати розміри більші, ніж у мідних пластин 1, що виключить замикання пластин сталевими (армируючими) кільцями 3.

Електричний контакт із колектором здійснюється за допомогою щіток, розташовуваних у щіткотримачах 4 (див. мал. 24.4).

Щіткотримач (мал. 24.8) складається з обойми 4, у яку поміщають щітку 3, курка 1, що представляє собою відкидну деталь, що передає тиск пружини 2 на щітку. Щіткотримач кріплять на пальці затискачем 5. Щітка забезпечується гнучким тросиком 6 для включення її в електричний ланцюг машини. Всі щіткотримачі однієї полярності з'єднані між собою збірними шинами, підключеними до виводів машини. Одне з основних умов безперебійної роботи машини - щільний і надійний контакт між щіткою й колектором. Тиск на щітку повинне бути відрегульоване, тому що надмірний натиск може викликати передчасне зношування щітки й перегрів колектора, а недостатній натиск - іскріння на колекторі.

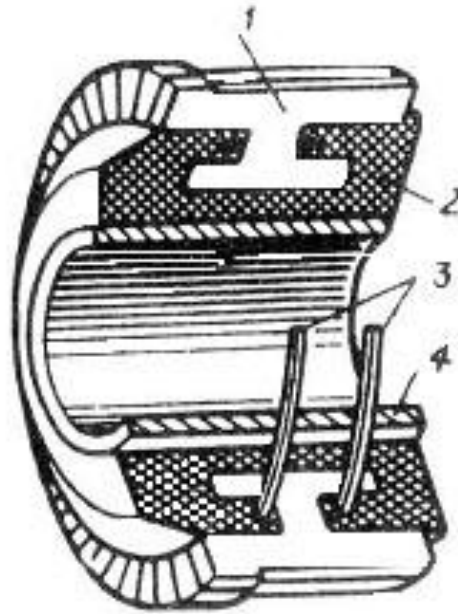


Рис. 24.7. Пристрій колектора на пластмасі

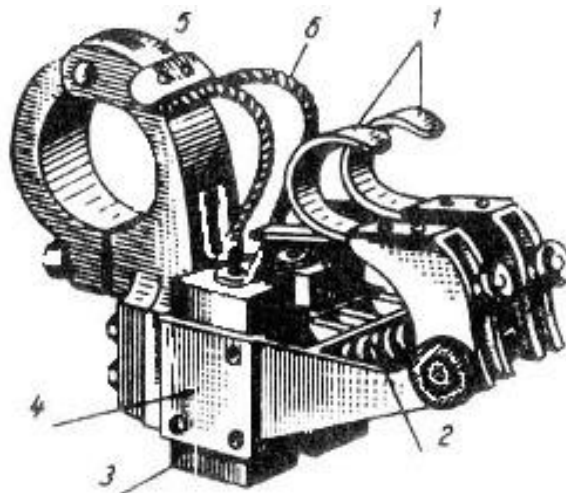


Рис. 24.8. Щіткотримач (здвоєний) машини постійного струму

Крім зазначених частин машина постійного струму має два підшипникових щити: передній 12 (з боку колектора) і задній 7 (див. мал. 24.4). У центральній частині щита є розточення під підшипник. На передньому підшипниковому щиті є оглядове вікно (люк) із кришкою, через яке можна оглянути колектор і щітки, не розбираючи машини. Кінці обмоток виведені на затискачі коробки виводів. Вентилятор 8 служить для самовентиляції машини: повітря надходить у машину звичайно з боку колектора, обмиває нагріті частини (колектор, обмотки й сердечники) і викидається із протилежної сторони через ґрати.

З розгляду принципу дії й будови колекторної машини постійного струму треба, що неодмінним елементом цієї машини, включеним між обмоткою якоря й зовнішньою мережею, є щітково-колекторний вузол - механічний перетворювач роду струму. Таким чином, колекторні машини складніше безколекторних машин змінного струму (асинхронної й синхронної) і, отже, уступають їм (особливо асинхронній машині) у надійності й мають більше високу вартість.

Самостійна робота №36

Тема: Хвильова обмотка якоря колекторної машини.

Мета: ознайомитися з методом отримання хвильвої обмотки якоря та з її видами.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Проста хвильова обмотка
- 2 Складна хвильова обмотка

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Як отримати просту хвильову обмотку якоря колекторної машини?
- 2 Як отримати складну хвильову обмотку якоря колекторної машини?
- 3 Як отримати лівоходну хвильову обмотку якоря колекторної машини?
- 4 Як отримати правоходну хвильову обмотку якоря колекторної машини?
- 5 Як визначається крок простої та складної хвильвої обмотки якоря колекторної машини?

1 Проста хвильова обмотка

Просту хвильову обмотку одержують при послідовному з'єднанні секцій, що перебувають під різними парами полюсів (мал. 25.7). Кінці секцій простої хвильової обмотки приєднані до колекторних пластин, вилученим друг від друга на відстань кроку обмотки по колекторі $y_k = v$. За один обхід по якорі укладають стільки секцій, скільки пар полюсів має машина, при цьому кінець останньої по обходу секції приєднують до пластини, розташованої радом з вихідної.

Просту хвильову обмотку називають *левоходовою*, якщо кінець останньої по обходу секцій приєднується до пластини, що перебуває ліворуч від вихідної (мал. 25.7, а). Якщо ж ця пластина перебуває праворуч від вихідної, то обмотку називають *правоходовою* (мал. 25.7, б). Секції хвильової обмотки можуть бути одновитковими й багатовитковими. *Крок простої хвильової обмотки по колекторі*

$$y_k = y = (K \mp 1) / p \quad (25.6)$$

Знак мінус відповідає левоходовій обмотці, а знак плюс - правоходовій. Правоходова обмотка не одержала практичного застосування, тому що її виконання пов'язане з додатковою витратою міді на перехрещування лобових частин.

Перший частковий крок обмотки визначають по (25.3), а другий частковий крок $y_2 = y - y_1$.

Приклад. Четырехполюсная машина постійного струму має просту хвильову обмотку якоря з 13 секцій. Побудувати розгорнуту схему й схему паралельних галузей цієї обмотки.

Рішення. Кроки обмотки: $y_k = y = (K \mp 1) / p = (13 - 1) / 2 = 6$ пазів;
 $y_1 = [Z_{\Sigma} / (2p)] \mp \varepsilon = 13 / 4 - 0,25 = 3$ паза; $y_2 = y_k - y_1 = 6 - 3 = 3$ паза.

При першому обході по якорі укладаємо секції 1 й 7 (мал. 25.7, в). При другому обході укладаємо секції 13 й 6 і т.д., поки не будуть покладені всі 13 секцій й обмотка не виявиться замкнутою. Секції 3, 6 й 9 у розглянутий момент часу замкнуті на коротко через щітки однакової полярності й проведення, що з'єднують їх.

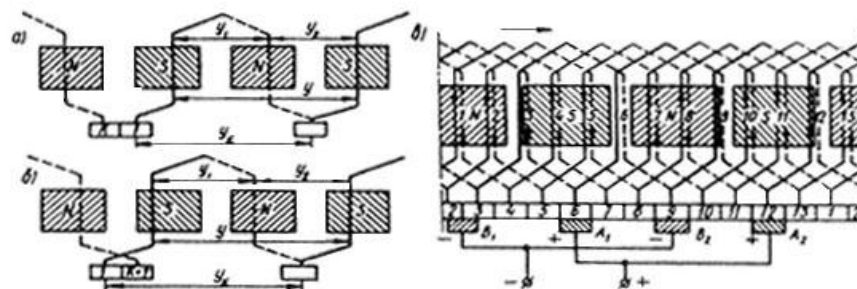


Рис. 25.7. Проста хвильова обмотка: а — правоходовая, б — левоходовая; в — розгорнута схема

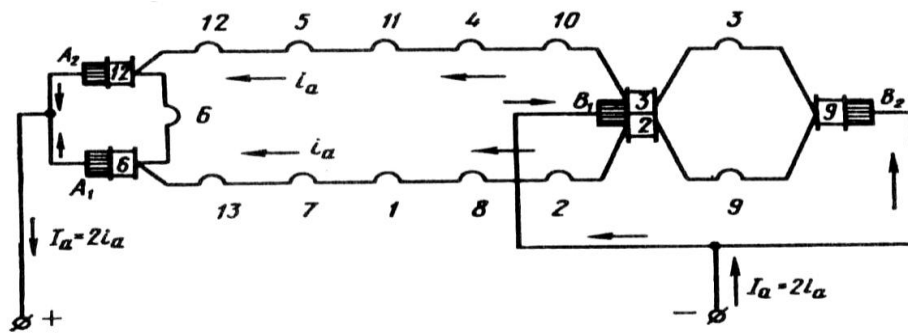


Рис. 25.8. Електрична схема обмотки мал. 25.7, в

Потім визначаємо полярність щіток. Далі виконуємо електричну схему (схему паралельних галузей), з якої видно (мал. 25.8), що обмотка складається із двох паралельних галузей ($2a = 2$). Це є характерним для простих хвильових обмоток, у яких число паралельних галузей не залежить від числа полюсів і завжди дорівнює двом.

З розглянутих схем видно, що секції, що входять в одну паралельну галузь, рівномірно розподілені під всіма полюсами машини. Слід також зазначити, що в простій хвильовій обмотці можна було б обійтися двома щітками, наприклад щітками B_2 й A_2 . Але в цьому випадку порушилася б симетрія обмотки, і число секцій у паралельних галузях стало б неоднаковим: в одній галузі сім секцій, а в іншій - шість. Тому в машинах із простими хвильовими обмотками встановлюють повний комплект щіток, стільки ж, скільки головних полюсів, тим більше що це дозволяє зменшити значення струму, що доводиться на кожену щітку, а отже, зменшити розміри колектора.

2 Складна хвильова обмотка

Кілька простих хвильових обмоток (звичайно дві), покладених на одному якорі, утворять складну хвильову обмотку.

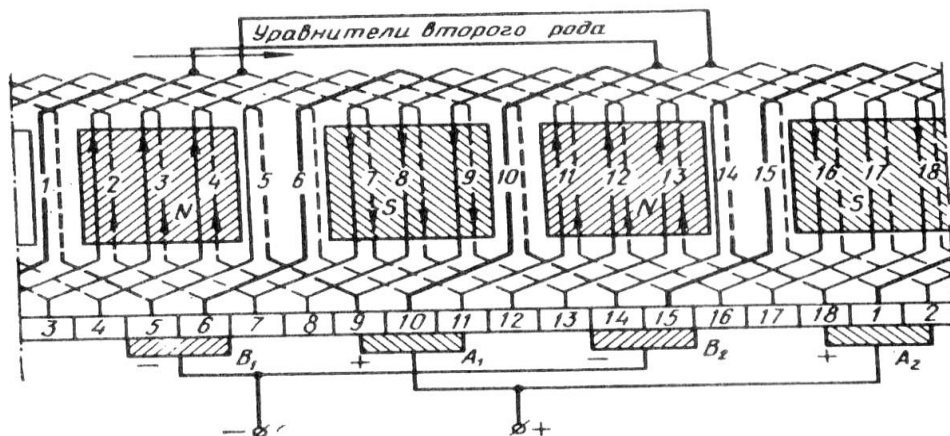


Рис. 25.9. Розгорнута схема складної хвильової обмотки

Число паралельних галузей у складній хвильовій обмотці $2a = 2m$ (звичайно $2a = 4$), де m — число простих обмоток у складній (звичайно $m = 2$). Прості обмотки, що входять у складну, з'єднують паралельно за допомогою щіток. Крок по колекторі, а отже, і результуючий крок по якорі

$$y_k = y = (K \mp m) / p. \quad (25.7)$$

Перший частковий крок по якорі визначають по (25.3).

Самостійна робота №37

Тема: Вирівнюючі з'єднання і комбіновані обмотки якоря колекторних машин.

Мета: вивчити умови симетрії обмоток якоря; ознайомитися з методом отримання зрівняльних з'єднань та їх призначенням, вивчити конструкцію комбінованих обмоток.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Умови симетрії обмотки якоря
- 2 Зрівняльні з'єднання
- 3 Комбінована обмотка

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Які умови симетрії обмоток якоря?
- 2 Які причини виникнення магнітної несиметрії?
- 3 Яким чином виконуються зрівняльні з'єднання?
- 4 Як визначається потенційний крок? Що це?
- 5 Поясніть конструкцію комбінованих обмоток. Зарисуйте схематичний рисунок.

1 Умови симетрії обмотки якоря

Обмотку якоря називають *симетричною*, якщо її паралельні галузі мають однакові електричні властивості: мають однакові електричні опори й у них індуються однакові ЕДС. У *несиметричній* обмотці якоря струм якоря розподіляється в паралельних галузях неоднаково, що спричиняє перевантаження одних галузей у недовантаження інших. У результаті ростуть електричні втрати в обмотці якоря, а корисна потужність машини зменшується.

Обмотка якоря стає симетричною лише при дотриманні певних умов, названих *умовами симетрії*.

Перша умова. Кожна пара паралельних галузей обмотки повинна складатися з однакового числа секцій. Ця умова виконується, якщо на кожну пару паралельних галузей доводиться однакове число секцій, тобто відношення числа секцій S до числа пар паралельних галузей a обмотки якоря дорівнює цілому числу (ц.ч.):

$$S/a = \text{ц. ч.} \quad (25.8)$$

Неважко переконатися, що при недотриманні цієї умови електричний опір паралельних галузей, а також їх ЕДС стають неоднаковими. Це привело б до нерівномірного розподілу струмів у паралельних галузях з усіма небажаними наслідками.

Друга умова. Секції кожної пари паралельних галузей повинні займати на якорі однакове число пазів:

$$Z/a = \text{ц. ч.} \quad (25.9)$$

Третя умова. Кожна пара паралельних галузей обмотки повинна займати однакове положення щодо системи головних полюсів, що здійснено при

$$2p/a = \text{ц.ч.} \quad (25.10)$$

Для складної петлевої обмотки $2a = 2pm$. Підставляючи це в (25.10), одержимо

$$2p/a = 2p/(pm) = 2/m = \text{ц. ч.}$$

Звідси треба, що складна петлева обмотка буде симетричною тільки при $m = 2$.

2 Зрівняльні з'єднання

Навіть при дотриманні всіх умов симетрії обмоток ЕДС паралельних галузей обмотки якоря в багатополюсних машинах можуть виявитися неоднаковими. Причина цього — *магнітна несиметрія*, через неї магнітні потоки однойменних полюсів виявляються неоднаковими. Відбувається це через дефекти, що виникають при виготовленні машини: наявності раковин у виливку станини, неякісної зборки полюсів, неправильного центрування якоря, тобто його перекосу, отчого повітряний зазор під полюсами стає неоднаковим.

Вплив магнітної несиметрії на роботу машини залежить від типу обмотки якоря. У хвильових обмотках секції кожної паралельної галузі рівномірно розподілені під всіма полюсами машини, тому магнітна несиметрія не спричиняє нерівності ЕДС у паралельних галузях, тому що вона однаково впливає на всі паралельні галузі обмотки.

У петлевих обмотках якоря секції, що утворюють паралельну галузь, розташовані під суміжною парою полюсів. Тому при $2p > 2$ магнітна несиметрія стає причиною нерівності ЕДС паралельних галузей, що веде до появи в обмотці якоря зрівняльних струмів.

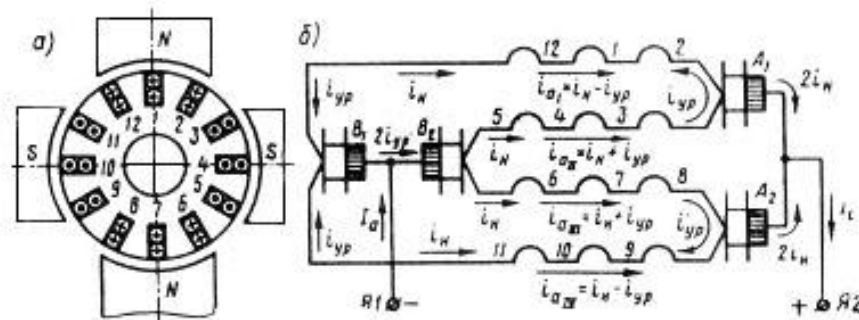


Рис. 25.10. Зрівняльні струми в паралельних галузях простий петлевої обмотки якоря при магнітній несиметрії

Наприклад, при неправильному центруванні якоря (мал. 25.10, а) ЕДС перших і четвертої паралельних галузей стають менше ЕДС другої й третьої галузей (зазор під нижнім полюсом менше, ніж під верхнім). При цьому потенціали щіток B_1 і B_2 виявляються неоднаковими й у паралельних галузях обмотки з'являються зрівняльні струми i_{yp} (мал. 25.10, б). Ці струми замикаються через шину, що з'єднує зазначені щітки, і в зовнішній ланцюг машини не виходять. Варто звернути увагу, що навіть при незначній різниці потенціалів u_{12} між щітками B_1 й B_2 струм i_{yp} може виявитися досить значним, тому що електричний опір паралельної галузі $r_{n.с}$ невелико. Наприклад, при $u_{12} = 2$ У и $r_{n.с} = 0,01$ Ом зрівняльний струм $i_{yp} = u_{12} / (2r_{n.с}) = 2 / (2 \cdot 0,01) = 100$ А.

Якщо при цьому навантажувальний струм у паралельній галузі $i_{n.с} = 200$ А, то струми в паралельних галузях обмотки стають неоднаковими: $i_{aI} = i_{aIV} = i_{n.с} - i_{yp} = 200 - 100 = 100$ А; $i_{aII} = i_{aIII} = i_{n.с} + i_{yp} = 200 + 100 = 300$ А.

Нерівномірне навантаження паралельних галузей веде до перегріву обмотки й збільшенню електричних втрат у ній. Перераховані явища порушують нормальну роботу машини, наприклад, перевантажуються деякі щітки (у розглянутому випадку — щітка B_2), що викликає інтенсивне іскріння на колекторі (див. § 27.3). Для зменшення нерівномірного навантаження щіток у простих петлевих обмотках надходять у такий спосіб: крапки обмотки якоря, потенціали яких теоретично повинні бути однаковими,

електрически з'єднують між собою. У цьому випадку виникаючі в обмотці зрівняльні струми замикаються усередині обмотки без виходу на щітки.

Зазначені з'єднання виконують мідними проводами й називають *зрівняльними з'єднаннями першого роду (зрівнювачами)*. Практично доступними для з'єднання крапками рівного потенціалу є кінці секцій, що приєднують до колекторних пластин, або лобові частини обмотки з боку, зворотної колектору.

Кількість крапок в обмотці, що мають однаковий потенціал, дорівнює числу полюсів у машині. Відстань між двома сусідніми крапками рівного потенціалу називають *потенційним кроком* y_{yp} . При розташуванні зрівняльних з'єднань із боку колектора потенційний крок виражається числом колекторних розподілів:

$$y_{yp} = K/a = K/p. \quad (25.11)$$

Повне число зрівнювачів першого роду, яке можна встановити в машині, дорівнює

$$N_{yp} = K/a. \quad (25.12)$$

Однак така кількість зрівняльних з'єднань застосовують тільки в машинах великої потужності, наприклад у двигунах прокатних станів. З метою економії міді й спрощення конструкції машини звичайно застосовують неповне число зрівнювачів. Наприклад, у чотирьохполюсних двигунах роблять 3-4 зрівняльні з'єднання. Зрівняльні з'єднання виконують проведенням, перетин якого становить 25-50 % перетину проведення обмотки якоря.

Приклад 25.6. У машині з $2p = 4$ і простий петлевої обмоткою якоря з 12 секцій необхідно встановити зрівнювачі першого роду, постачивши ними кожен другу пластину.

Рішення. Потенційний крок $y_{yp} = K/p = 12/2 = 6$. Повне число зрівнювачів $N_{yp} = y_{yp} = K/a = 12/2 = 6$.

Відповідно до умови завдання показуємо на схемі $0,5 N_{yp} = 3$ зрівнювачі, розташувавши їх з боку колектора (мал. 25.11) і з'єднавши із пластинами в такий спосіб: перший зрівнювач з'єднуємо із пластинами 1 й 7, другий - з 3 й 9, третій — з 5 й 11

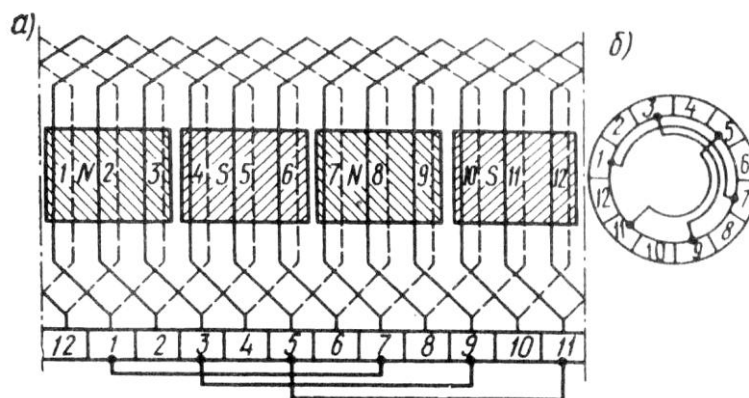


Рис. 25.11. Зрівняльні з'єднання першого роду:

a — розгорнута схема обмотки, *б* — вид з боку колектора

У складних петлевих і хвильових обмотках прості обмотки, що утворюють складну, з'єднані паралельно через щітковий контакт. Але забезпечити однаковий контакт щіток з усіма простими обмотками практично неможливо, тому струм між простими обмотками розподіляється неоднаково, що порушує рівномірний розподіл потенціалу по колекторі й можемо викликати на ньому іскріння. Для усунення цього небажаного явища застосовують *зрівняльні з'єднання (зрівнювачі) другого роду*, за допомогою яких прості обмотки, що входять у складну, електрически з'єднують між собою в крапках рівного потенціалу. Таким чином, якщо зрівнювачі першого роду усувають небажані наслідки магнітної несиметрії, то зрівнювачі другого роду усувають нерівномірність у розподілі потенціалу по колекторі при складних обмотках якоря.

На мал. 25.9 представлена схема складної хвильової обмотки зі зрівнювачами другого роду, що з'єднують крапки рівного потенціалу на лобових частинах обмотки з боку, протилежної колектору. Ці крапки відстоять друг від друга на відстані потенційного кроку

$$y_{yp} = K / a = 18 / 2 = 9.$$

Секцію 2 з'єднують із секцією 11, секцію 3 — із секцією 12 і т.д. (на схемі показані лише два зрівнювачі). Повне число зрівнювачів визначається по (25.12), але з міркування економії міді звичайно роблять неповне число зрівнювачів другого роду.

В складних петлевих обмотках зрівнювачі другого роду виконують, як показано на мал. 25.12. Через того що в цій обмотці кожну секцію однієї із простих обмоток приєднують до пластин колектора, розташованим через одну (наприклад, до непарних пластин), те пластини, що перебувають між ними (наприклад, парні), ділять напруга кожної секції на дві частини. Для забезпечення рівномірного розподілу напруги між пластинами необхідно, щоб ці частини були однаковими, тобто щоб напруга між кожною парою рядом лежачих пластин (наприклад 1 й 2) було дорівнює половині напруги секції. Із цією метою в обмотці застосовують зрівнювачі другого роду, за допомогою яких середину секції з боку, протилежної колектору, з'єднує із проміжною пластиною (наприклад, середину секції, приєднаної до пластин 1 й 3, з'єднують із пластиною 2, як це показано на мал. 25.12). Такий зрівнювач доводиться «протягати» між валом і сердечником якоря через спеціальний отвір.

Таким чином, якщо в складних хвильових обмотках застосовують лише зрівнювачі другого роду, то в складних петлевих обмотках необхідні як зрівнювачі першого, так і зрівнювачі другого роду.

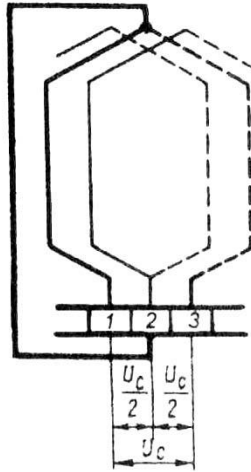


Рис. 25.12. Зрівняльні з'єднання другого роду в складній петлевої обмотці якоря

3 Комбінована обмотка

Комбінована (жаб'яча) обмотка являє собою сполучення петлевої і хвильовий обмоток, розташованих в одних пазах і приєднаних до загального колектора. Секція цієї обмотки показана на мал. 25.13, а. Тому що кожна зі складових обмоток двошарова, те комбіновану обмотку укладають у пазах якоря в чотири шари, а до кожної пластини колектора припаюють по чотирьох провідника.

Достоїнство комбінованої обмотки — велика кількість паралельних галузей при відсутності зрівняльних з'єднань. Однак деякі технологічні труднощі у виконанні комбінованих обмоток обмежують їхнє застосування машинами постійного струму великої потужності, а також швидкохідними машинами, у яких виконання зрівнювачів утруднене.

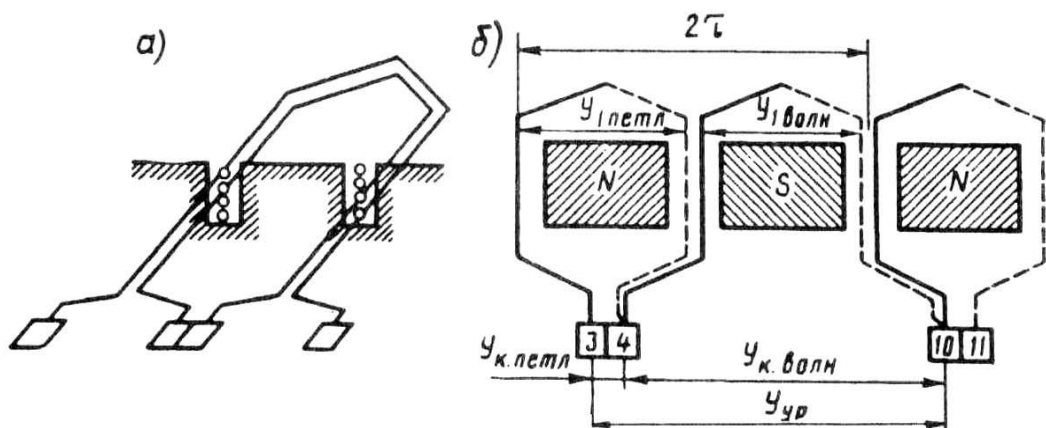


Рис. 25.13. Комбінована обмотка якоря

На мал. 25.13, б показана частина розгорнутої схеми комбінованої обмотки. Кроки секцій комбінованої обмотки приймають однаковими

($y_{1петл} = y_{1волн}$). Крок по якорі комбінованої обмотки дорівнює сумі кроків складових обмоток:

$$y_1 = y_{1петл} + y_{1волн} = \frac{Z_{\Delta}}{2p} + \frac{Z_{\Delta}}{2p} = \frac{Z_{\Delta}}{p} = \frac{K}{p} = y_{ур},$$

т. е. *крок комбінованої обмотки по якорі дорівнює потенційному кроку* [див. (25.11)]. Тому пластини колектора, які повинні бути з'єднані зрівнювачами, у комбінованій обмотці виявляються з'єднаними секціями.

Варто звернути увагу, що комбінована обмотка здійснена лише за умови рівності чисел паралельних галузей у хвильовій і петлевої складових обмотках. При цьому ЕДС паралельних галузей обмоток повинні бути однаковими. У петлевої обмотці число паралельних галузей $2a = 2p$, у хвильовій обмотці $2a = 2$. Для одержання однакового числа паралельних галузей в обмотках хвильову обмотку виконують складної із числом $m_{волн} = p$. Число паралельних галузей у комбінованій обмотці $2a = 2a_{петл} + 2a_{волн} = 4a_{петл}$.

Самостійна робота №38

Тема: Вибір типу обмоток якоря колекторних машин.

Мета: вивчити параметри за якими обирається обмотка якоря колекторної машини.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Параметри вибору типу обмотки якоря

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Яким параметрам повинна відповідати обрана обмотка якоря колекторної машини?
- 2 Запишіть формулу для визначення кількості пазових провідників обмотки якоря колекторної машини.
- 3 За якими параметрами обирають обмотку якоря колекторної машини?
- 4 Якому з параметрів надають перевагу при виборі обмотки якоря колекторної машини?

1 Загальні поняття

Застосування в машині постійного струму того або іншого типу обмотки якоря визначається техніко-економічними вимогами. Обраний тип обмотки повинен забезпечувати в машині необхідну ЕРС при заданому струмі. При цьому варто прагнути до мінімального числа зрівняльних з'єднань. Вимоги економічного характеру при виборі типу обмотки зводяться до можливо кращого використання пазів сердечника якоря, що визначається значенням коефіцієнта заповнення паза міддю [див. (8.4)].

Обраний тип обмотки повинен містити можливо менше число пазових провідників N , тому що в протилежному випадку значна частина площі паза буде зайнята ізоляцією цих провідників. Преобразуя вираження (25.20), одержимо

$$N = 60aE_a / (p\Phi n). \quad (25.28)$$

2 Параметри вибору типу обмотки якоря

При заданих E_a, p, Φ і n число провідників в обмотці прямо пропорційно числу пара паралельних галузей. Тому при виборі типу обмотки варто віддавати перевагу обмоткам якоря з мінімальним числом паралельних галузей, наприклад, простій хвильовій обмотці з $2a = 2$, що до того ж не вимагає зрівняльних з'єднань. У табл. 25.1 наведені рекомендації з вибору типу обмотки якоря для двигунів постійного струму загальпромислового призначення залежно від числа полюсів і сили струму якоря.

Таблиця 25.1

Число полюсів $2p$	Струм якоря, I_a , А	Тип обмотки якоря
2	—	Проста петлевая
4	До 700	» хвильова
4	Понад 700 до 1400	» петлевая або комбінована
4	Понад 1400	Складна петлевая ($m = 2$) або комбінована

До умов, що обмежують застосування простої хвильової обмотки, варто віднести в першу чергу гранично припустиме значення струму в паралельній галузі (300—400 А) і середнє значення напруги між суміжними колекторними пластинами $U_{к.ср} = 2pU / K$, що не повинне перевищувати (В):

Машини потужністю до 1 квт	25—30
Машини потужністю більше 1 квт без компенсаційної обмотки	16
Машини з компенсаційною обмоткою	20

Зазначені граничні значення $U_{к.ср}$ поширюються й на обмотки якоря інших типів. При перевищенні зазначених меж з'являється ймовірність виникнення в машині небезпечного явища, називаного коловим вогнем (див. § 27.4).

Самостійна робота №39

Тема: Магнітне коло машини постійного струму.

Мета: вивчити порядок розрахунку магнітного кола машини постійного струму.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Порядок розрахунку магнітних напруг

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Зарисуйте картину магнітного кола чотирьохполюсної машини постійного струму, що працює в режимі х.х..
- 2 Як визначається МРС обмотки збудження на парі полюсів машини постійного струму в режиму х.х.?
- 3 Опишіть порядок розрахунку магнітних напруг на ділянках магнітного кола машини постійного струму.
- 4 Від чого залежать значення магнітних напруг на різних ділянках магнітного кола машини постійного струму?
- 5 Побудуйте магнітну характеристику машини постійного струму. Поясніть принцип побудови.

1 Загальні поняття

Магнітна система машини постійного струму складається зі станини (ярма), сердечників головних полюсів з полюсними наконечниками, повітряного зазору й сердечника якоря.

На мал. 26.1 показана картина магнітного поля чотирьохполюсної машини. При цьому мається на увазі машина, що працює в режимі х.х., коли МРС створюється лише обмоткою збудження, а в обмотці якоря й обмотці додаткових полюсів токовища немає або він настільки малий, що його впливом на картину магнітного поля можна зневажити. З метою спрощення на малюнку не показані додаткові полюси, тому що в режимі х.х. їхній вплив на картину магнітного поля машини незначно. Як це треба з мал. 26.1, магнітний потік головних полюсів складається із двох нерівних частин: більша частина утворює основний магнітний потік Φ , а менша — магнітний потік розсіювання полюсів Φ_σ . Потік розсіювання враховується коефіцієнтом розсіювання σ_m (див. § 20.1).

Магніторушійна сила обмотки збудження на парі полюсів у режимі х.х. визначається сумою магнітних напруг на ділянках магнітного ланцюга (мал. 26.2):

$$F_{BO} = \sum F = 2F_\delta + 2F_Z + 2F_m + F_a + F_\gamma, \quad (26.1)$$

де $F_\delta, F_Z, F_m, F_a, F_\gamma$ — магнітні напруги повітряного зазору, зубцового шаруючи якоря, головного полюса, спинки якоря, станини (ярма) відповідно.

Якщо машина має компенсаційну обмотку (див. § 26.4), то в (26.1) варто ввести ще один доданок F_{Zm} , що представляє собою магнітна напруга зубцового шаруючи головного полюса.

2 Порядок розрахунку магнітних напруг

Порядок розрахунку магнітних напруг на ділянках магнітного ланцюга машини постійного токовища в принципі такої ж, що й у випадку асинхронної машини (див. гл. 11). При цьому розрахунок магнітних напруг станини й сердечника головного полюса ведуть по магнітному потоці головного полюса Φ_m , що більше основного потоку Φ на значення потоку розсіювання Φ_σ :

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \sigma_m)$$

де $\sigma_m \approx 10\delta/\tau = 0,10 \div 0,25$ — коефіцієнт магнітного розсіювання.

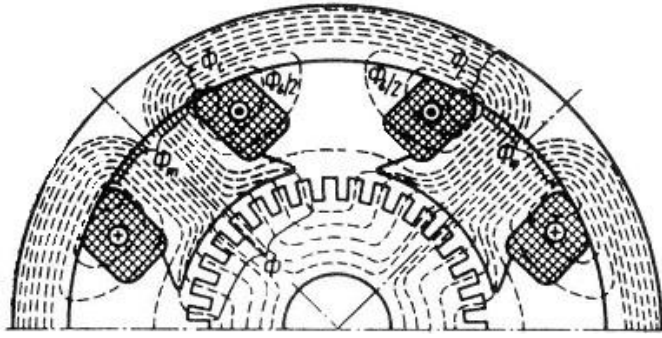


Рис. 26.1. Магнітне поле машини постійного токовища в режимі х.х.

При заданому значенні ЕРС машини E_a визначають необхідне значення основного магнітного потоку (Вб) [див. (25.20)]:

$$\Phi = \frac{60aE_a}{pNn}. \quad (26.2)$$

Далі розраховують магнітну індукцію для кожної ділянки магнітного ланцюга:

$$B_x = \Phi_x / S_x, \quad (26.3)$$

де Φ_x — магнітний потік на даній ділянці магнітного ланцюга. Вб;

S_x — площа поперечному перерізі цієї ділянки, м^2 .

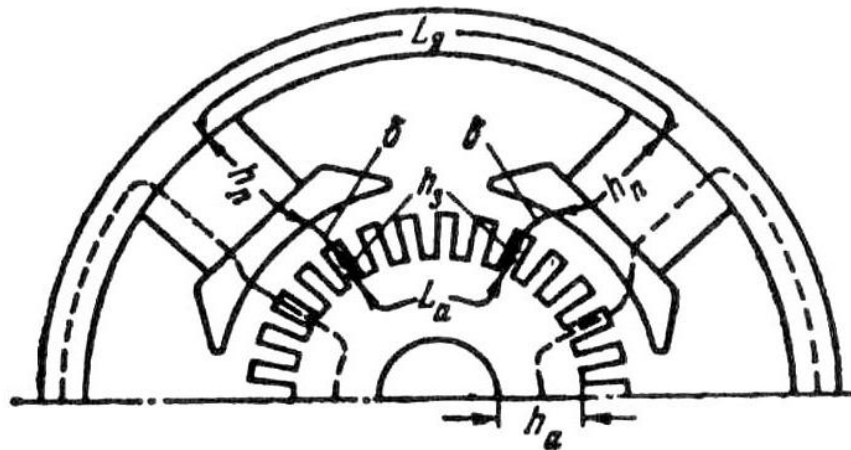


Рис. 26.2. Розрахункова ділянка магнітного ланцюга чотирьохполюсної машини постійного токовища

По таблицях або кривим намагнічування для відповідних феромагнітних матеріалів знаходять напруженість магнітного поля на ділянках магнітного ланцюга H_x , а потім визначають магнітну напругу (А)

$$F_x = H_x l_x$$

і МРС обмотки збудження на парі полюсів по (26.1).

Значення магнітних напруг для різних ділянкою магнітного ланцюга неоднакові й залежать від магнітних опорів цих ділянок. Найбільшим магнітним опором володіє повітряний зазор, тому магнітна напруга F_δ набагато більше кожного зі складає вираження, що (26.1).

Інші ділянки магнітного ланцюга виконують із феромагнітних матеріалів. У машинах постійного токовища для виготовлення різних елементів магнітного ланцюга застосовують наступні матеріали.

Сердечник якоря — тонколистові електротехнічні сталі марок 2013, 2312 й 2411 товщиною 0,5 мм (див. табл. 11.1).

Сердечник головного полюса — листова анізотропна (холоднокатана) сталь марки 3411 товщиною 1 мм, пластини не ізолюють.

Станина — у машинах малої потужності станину виготовляють зі сталевих суцільнотягнутих труб, а для машин середньої й великої потужності станини роблять, звареними з листової конструкційної сталі марки СтЗ.

Магнітна напруга повітряного зазору (А)

$$F_\delta = 0,8B_\delta k_\delta \cdot 10^3, \quad (26.4)$$

де δ — величина повітряного зазору, мм; k_δ — коефіцієнт повітряного зазору, що враховує збільшення магнітного опору зазору через зубчатості якоря ($k_\delta > 1$).

Магнітна індукція в повітряному зазорі B_δ (Тл) пропорційна основному магнітному потоку Φ . У машинах постійного токовища загального призначення $B_\delta = 0,6 \div 1,0$ Тл (більші значення B_δ відповідають більшим машинам).

Зазвичай розрахунок МРС ΣF ведуть для ряду значень магнітного потоку ($0,5\Phi_{ном}$, $0,75\Phi_{ном}$, $\Phi_{ном}$ й $1,2\Phi_{ном}$), а потім будують магнітну характеристику машини $\Phi_* = f(\Sigma F_*)$, де $\Phi_* = \Phi / \Phi_{ном}$ — відносне значення магнітного потоку; $\Sigma F_* = \Sigma F / \Sigma F_{ном}$ — відносне значення МРС обмотки збудження на парі полюсів у режимі х.х.; $\Phi_{ном}$ і $\Sigma F_{ном}$ — номінальні значення магнітного потоку й МДС у режимі х.х., що відповідають номінальному значенню ЕРС E_a [див. (26.2)]. У початковій частині магнітна характеристика прямолінійна (мал. 26.3). Порозумівається це тим, що при невеликих значеннях ΣF_* магнітний ланцюг не насичений і МРС збудження визначається, в основному, магнітним напругою повітряного зазору $\Sigma F = 2F_\delta$.

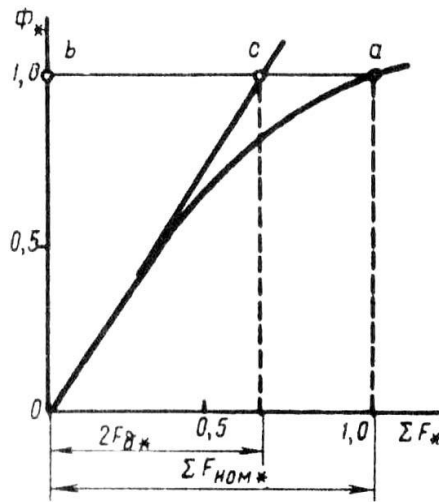


Рис. 26.3 Магнітна характеристика

Потім з ростом ΣF_* наступає насичення магнітного ланцюга й магнітна характеристика стає криволінійною. Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга машини

$$k_\mu = \Sigma F_{ном*} / (2F_{\delta*}) = ba / bc = 1 / (2F_{\delta*}). \quad (26.5)$$

Для машин постійного токовища $k_\mu = 1,2 \div 1,7$.

Самостійна робота №40

Тема: Реакція якоря машини постійного струму.

Мета: ознайомитися з реакцією якоря машини постійного струму при різних магнітних системах.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Загальні поняття
- 2 Реакція якоря машини постійного струму при ненасиченій магнітній системі
- 3 Реакція якоря машини постійного струму при насиченій магнітній системі

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Де виникає найбільше значення МРС якоря машини постійного струму? Чому?
- 2 Дайте визначення поняття лінійне навантаження.
- 3 Від чого залежить значення лінійного навантаження?
- 4 Що таке реакція якоря машини постійного струму?
- 5 Поясніть реакцію якоря машини постійного струму при ненасиченій магнітній системі.
- 6 Поясніть реакцію якоря машини постійного струму при насиченій магнітній системі.
- 7 В якому випадку вплив реакції якоря на роботу електричної машини підсилюється? Як його послабити?

1 Загальні поняття

При роботі машини в режимі х.х. струм в обмотці якоря практично відсутній, а тому в машині діє лише МРС обмотки збудження F_{B0} . Магнітне поле машини в цьому випадку симетрично щодо осі полюсів (мал. 26.4, а). Графік розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі являє собою криву, близьку до трапеції.

Якщо ж машину навантажити, то в обмотці якоря з'явиться струм, що створить у магнітній системі машини МРС якоря F_a . Допустимо, що МРС збудження дорівнює нулю й у машині діє лише МРС якоря. Тоді магнітне поле, створене цієї МРС, буде мати вигляд, представлений на мал. 26.4, б. Із цього малюнка видно, що МРС обмотки якоря спрямована по лінії щіток (у цьому випадку по геометричній нейтралі). Незважаючи на те, що якір обертається, просторове положення МРС обмотки якоря залишається незмінним, тому що напрямок цієї МРС визначається положенням щіток.

Найбільше значення МРС якоря — на лінії щіток (мал. 26.4, б, крива 1), а по осі полюсів ця МРС дорівнює нулю. Однак розподіл магнітної індукції в зазорі від потоку якоря збігається із графіком МРС лише в межах полюсних наконечників. У межполюсному просторі магнітна індукція різко послабляється (мал. 26.4, б, крива 2). Порозумівається це збільшенням магнітного опору потоку якоря в межполюсному просторі. МРС обмотки якоря на парі полюсів пропорційна числу провідників в обмотці N і токовища якоря I_a :

$$F_a = NI_a / (4ap). \quad (26.6)$$

Уведемо поняття *лінійного навантаження* (А/м), що представляє собою сумарне токовище якоря, що доводиться на одиницю довжини його окружності по зовнішньому діаметрі якоря D_a :

$$A = Ni_a / (\pi D_a), \quad (26.7)$$

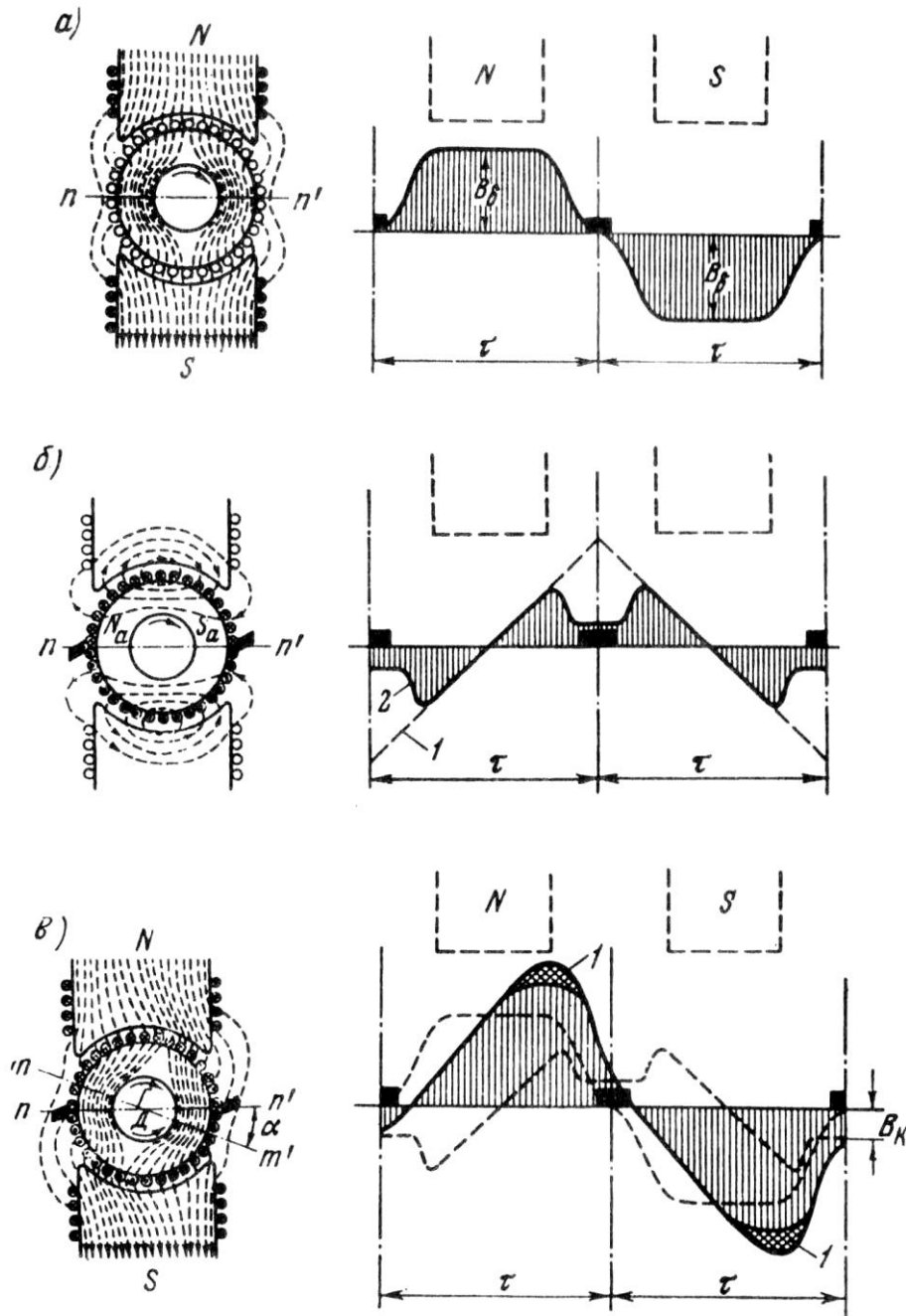
де $i_a = I_a / (2a)$ — токовище одного провідника обмотки, А.

Значення лінійного навантаження для машин постійного токовища загального призначення залежно від їхньої потужності може бути $(100 \div 500) \cdot 10^2$ А/м. Скориставшись лінійним навантаженням, запишемо вираження для МРС якоря: $F_a = A\tau$. Таким чином, у навантаженій машині постійного токовища діють два МДС: збудження F_{B0} і якорі F_a .

Вплив МРС обмотки якоря на магнітне поле машини називають *реакцією якоря*. Реакція якоря спотворює магнітне поле машини, робить його несиметричним щодо осі полюсів.

2 Реакція якоря машини постійного струму при ненасиченій магнітній системі

На мал. 26.4, у показаний розподіл магнітних силових ліній результуючого поля машини, що працює в генераторному режимі при обертанні якоря по годинній стрілці. Такий же розподіл магнітних ліній відповідає роботі машини в режимі двигуна, але при обертанні якоря проти вартовий стрілки. Якщо прийняти, що магнітна система машини *не насичена*, то реакція якоря буде лише спотворювати результуючий магнітний потік, не змінюючи його значення: край полюса й перебуває під ним зубцовий шар якоря, де МРС якоря збігається по напрямку із МРС збудження, *подмагнічуються*; інший край полюса й зубцовий шар якоря, де МРС спрямована проти МРС збудження, *розмагнічуються*. При цьому результуючий магнітний потік як би повертається щодо осі головних полюсів на деякий кут, а фізична нейтраль mm' (лінія, що проходить через крапки на якорі, у яких індукція дорівнює нулю) зміщається щодо геометричної нейтралі mm' на кут α . Чим більше навантаження машини, тим сильніше перекручування результуючого поля, а отже, тим більше кут зсуву фізичної нейтралі. *При роботі машини в режимі генератора фізична нейтраль зміщається по напрямку обертання якоря, а при роботі двигуном - проти обертання якоря.*



26.4. Магнітне поле машини й розподіл магнітної індукції у повітряному зазорі

Перекручування результуючого поля машини несприятливо відбивається на її робочих властивостях. По-перше, зрушення фізичної нейтралі щодо геометричної приводить до більше тяжких умов роботи щіткового контакту й може послужити причиною посилення іскріння на колекторі (див. § 27.1). По-друге, перекручування результуючого поля машини спричиняє перерозподіл магнітної індукції в повітряному зазорі машини. На мал. 26.4, у показаний графік розподілу результуючого поля в зазорі, отриманий сполученням кривих, зображених на мал. 26.4, *а*, *б*. Із цього графіка треба, що магнітна індукція в зазорі машини розподіляється несиметрично щодо осі

полюсів, різко збільшуючись під подмагніченими краями полюсів. Це приводить до того, що миттєві значення ЕРС секцій обмотки якоря в моменти влучення їхніх пазових сторін у зони максимальних значень магнітної індукції (під подмагніченні краями полюсних наконечників) різко підвищуються. У результаті зростає напруга між суміжними колекторними пластинами U_k . При значних навантаженнях машини напругу U_k можемо перевершити припустимі межі (див. § 25.5) і миканитова прокладка між суміжними пластинами буде перекрита електричною дугою. Наявні на колекторі частки графіту будуть сприяти розвитку електричної дуги, що приведе до виникнення потужної електричної дуги, що перекриває весь колектор або значну його частину, - явища надзвичайно небезпечного (див. § 27.5).

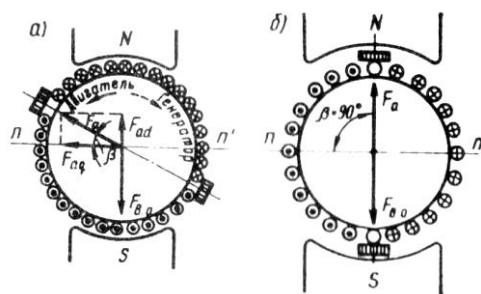


Рис. 26.5. Розкладання МДС обмотки якоря на поздовжню й поперечну складові

Такі наслідки впливу реакції якоря на машину з ненасиченою магнітною системою.

3 Реакція якоря машини постійного струму при насиченій магнітній системі

Якщо ж магнітна система машини *насичена*, що має місце в більшості електричних машин, то підмагнічування одного краю полюсного наконечника й перебуває під ним зубцового шаруючи якоря відбувається в меншому ступені, чим розмагнічування іншого краю й перебуває під ним зубцового шаруючи якоря. Це сприятливо позначається на розподілі магнітної індукції в зазорі, що стає більше рівномірним, тому що максимальне значення індукції під подмагнічуваным краєм полюсного наконечника зменшується на величину, обумовлену висотою ділянки l на мал. 26.4, в. Однак результуючий магнітний потік машини при цьому зменшується. Таким чином, реакція якоря в машині з насиченою магнітною системою розмагнічує машину (так само як й у синхронної машини при активному навантаженні). У результаті погіршуються робочі властивості машини: у генераторів знижується ЕРС, у двигунів зменшується обертаючий момент.

Вплив реакції якоря на роботу машини підсилюється при зсуві щіток з геометричної нейтралі. Порозумівається це тим, що разом із щітками

зміщується й вектор МДС якоря (мал. 26.5, а). При цьому МДС якоря F_a крім поперечної складової $F_{aq} = F_a \cos \beta$ здобуває й поздовжню складову $F_{ad} = F_a \sin \beta$, спрямовану по осі полюсів. Якщо машина працює в генераторному режимі, то при зсуві щіток у напрямку обертання якоря поздовжня складова МДС якоря діє зустрічно МРС обмотки збудження F_{B0} , що послабляє основний магнітний потік машини; при зсуві щіток проти обертання якоря поздовжня складова МРС якоря F_{ad} діє узгоджено із МРС F_{B0} , що викликає деяке підмагнічування машини й може з'явитися причиною іскріння на колекторі (див. гл. 27). Якщо машина працює в руховому режимі, то при зсуві щіток по напрямку обертання якоря поздовжня складова МРС якоря F_{ad} подмагнічує машину, а при зсуві щіток проти обертання якоря поздовжня складова F_{ad} розмагнічує машину. При подальшому розгляді питань, пов'язаних з дією поздовжньої складової МРС якоря, будемо мати на увазі лише її дія, що розмагнічує, тому що подмагнічующе F_{ad} дія в машинах постійного токовища загального призначення неприпустимо через порушення роботи щіткового контакту.

Варто звернути увагу на те, що зсув щіток з геометричної нейтралі впливає й на поперечну складову МРС якоря — величину, що залежить від кута β , з ростом якого вона зменшується ($F_{aq} = F_a \cos \beta$). Таким чином, у колекторних машинах можливі два випадки: 1) щітки встановлені на геометричній нейтралі й реакція якоря є тільки поперечною; 2) щітки зміщені з геометричної нейтралі й реакція якоря має дві складові — поперечну й поздовжню (размагнічующу). Принципово також можливий випадок, коли реакція якоря по поперечній осі відсутній. Це має місце, коли щітки розташовані по осі, перпендикулярної геометричній нейтралі, тобто коли $\beta = 90^\circ$ (мал. 26.5, б). Однак такий випадок не має практичного застосування, тому що машина стає непрацездатною: у генераторному режимі ЕРС машини дорівнює нулю, тому що в паралельну галузь обмотки входить рівне число секцій із зустрічним напрямком ЕРС, а в руховому режимі електромагнітні сили активних сторін обмотки якоря, що діють ліворуч і праворуч від осі щіток, рівні й протилежно спрямовані, а тому обертаючого моменту не створюють.

Самостійна робота №41

Тема: Усунення шкідливого впливу реакції якоря.

Мета: ознайомитися зі способами усунення шкідливого впливу реакції якоря.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Компенсаційна обмотка
- 2 Збільшення повітряного зазору під головними полюсами

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Які є способи усунення шкідливого впливу реакції якоря?
- 2 Як виконується компенсаційна обмотка?
- 3 Як вмикається компенсаційна обмотка в коло якоря?
- 4 При якій потужності електричної машини застосування компенсаційної обмотки є ефективним?
- 5 Як впливає на роботу електричної машини збільшення повітряного зазору під головними полюсами?

1 Компенсаційна обмотка

У зв'язку з тим що реакція якоря несприятливо впливає на робочі властивості машини постійного токовища¹, при проектуванні машини вживають заходів до усунення реакції якоря або хоча б до ослаблення її впливу до допустимих меж.

Найбільш ефективним засобом придушення впливу реакції якоря по поперечній осі є застосування в машині компенсаційної обмотки. Цю обмотку укладають у пази полюсних наконечників (мал. 26.7) і включають послідовно з обмоткою якоря таким чином, щоб МРС компенсаційної обмотки F_k була протилежна по напрямку МРС обмотки якоря F_a . Компенсаційну обмотку роблять розподіленою по поверхні полюсного наконечника всіх головних полюсів машини. При цьому лінійне навантаження для компенсаційної обмотки приймають рівній лінійному навантаженню обмотки якоря.

Включення компенсаційної обмотки послідовно в коло якоря забезпечує автоматичність компенсації МРС якоря при кожній (у межах номінальної) навантаженню машини. Таким чином, у машині постійного токовища з компенсаційною обмоткою при переході від холостого ходу до режиму навантаження закон розподілу магнітної індукції в зазорі головних полюсів залишається практично незмінним. Однак у межполюсному просторі частина МРС якоря залишається некомпенсованою. Небажаний вплив цієї МРС на роботу щіткового контакту усувають застосуванням у машині додаткових полюсів (див. § 27.4).

Компенсаційні обмотки застосовують лише в машинах середньої й великої потужності — більше 150—500 квт при $U > 440$ В, що працюють із різкими коливаннями навантаження, наприклад у двигунах для прокатних станів. Порозумівається це тим, що компенсаційна обмотка здорожує й ускладнює машину і її застосування в деяких випадках економічно не виправдується.

¹ Виключення становлять машини постійного токовища, у яких поперечне поле' якоря використаються корисно, наприклад електромашинні підсилювачі поперечного поля (див. § 30.1).

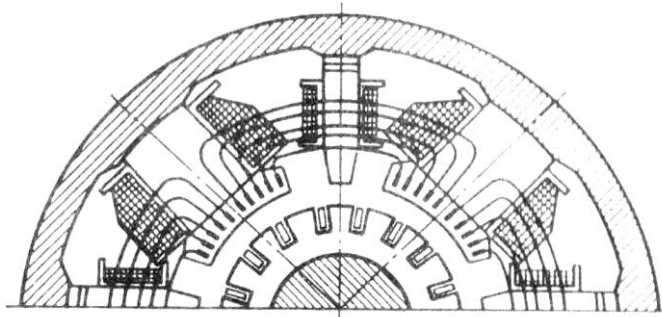


Рис. 26.7. Компенсаційна обмотка

2 Збільшення повітряного зазору під головними полюсами

У машинах малої й середньої потужності, що не мають компенсаційної обмотки, шкідливий вплив реакції якоря по поперечній осі послаблюють відповідним вибором повітряного зазору під головними полюсами. При цьому варто мати на увазі, що при досить малому повітряному зазорі й значному лінійному навантаженні реакція якоря по поперечній осі може не тільки послабити магнітне поле під однією із частин головного полюса, але й перемагнітити його, тобто змінити полярність - «перекинути поле». Деяке збільшення повітряного зазору під головними полюсами, особливо на їхніх краях, значно послабляє дія реакції якоря. Однак не слід забувати, що збільшення повітряного зазору веде до необхідності підвищення МРС обмотки головних полюсів, а отже, і до збільшення розмірів полюсних котушок, полюсів і габариту машини в цілому.

На цьому ж принципі зменшення МРС поперечної реакції якоря за рахунок підвищеного магнітного опору на шляху її дії заснований й інший спосіб ослаблення дії реакції якоря. Цей спосіб полягає в тому, що сердечники головних полюсів роблять із листовий анізотропної (холоднокатаної) сталі (звичайно застосовують сталь марки 3411). Ця сталь у напрямку прокату має підвищену магнітну проникність, а «поперек прокату» - невеликою магнітною проникністю. Штампувати пластини полюсів з такої сталі треба так, щоб вісь полюса збігалася з напрямком прокату листа сталі.

Самостійна робота №42

Тема: Причини іскріння на колекторі.

Мета: ознайомитися з причинами, що викликають іскріння на колекторі; зі ступенями іскріння та процесом комутації в електричній машині.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Причини, що викликають іскріння на колекторі
- 2 Ступені іскріння
- 3 Проце комутації

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 У чому полягають механічні причини іскріння на колекторі?
- 2 У чому полягають потенційні причини іскріння на колекторі?
- 3 У чому полягають комутаційні причини іскріння на колекторі?
- 4 Які є ступені іскріння на колекторі? Поясніть кожен з них.
- 5 Поясніть процес комутації електричної машини.

1 Причини, що викликають іскріння на колекторі

При роботі машини постійного струму щітки й колектор утворюють ковзний контакт. Площа контакту щітки вибирають за значенням робочого струму машини, що доводиться на одну щітку, відповідно до припустимої щільності струму для обраної марки щіток. Якщо з якоїсь причини щітка прилягає до колектора не всією поверхнею, то виникають надмірні місцеві щільності струму, що приводять до іскріння на колекторі.

Причини, що викликають іскріння на колекторі, розділяють на механічні, потенційні й комутаційні.

Механічні причини іскріння - слабкий тиск щіток на колектор, биття колектора, його еліптичність або негладка поверхня, забруднення поверхні колектора, выступання миканитової ізоляції над мідними пластинами, нещільне закріплення траверси, пальців або щіткотримачів, а також інші причини, що викликають порушення електричного контакту між щіткою й колектором.

Потенційні причини іскріння з'являються при виникненні напруги між суміжними колекторними пластинами, що перевищує припустиме значення (див. § 25.5). У цьому випадку іскріння найбільше небезпечно, тому що воно звичайно супроводжується появою на колекторі електричних дуг.

Комутаційні причини іскріння створюються фізичними процесами, що відбуваються в машині при переході секцій обмотки якоря з однієї паралельної галузі в іншу.

Іноді іскріння викликається цілим комплексом причин. З'ясування причин іскріння варто починати з механічних, тому що їх виявляють оглядом колектора й щіткового пристрою. Сутужніше виявити й усунути комутаційні причини іскріння.

При випуску готової машини із заводу в ній набудовують темну комутацію, що виключає яке-небудь іскріння. Однак у процесі експлуатації машини, у міру зношування колектора й щіток, можлива поява іскріння. У деяких випадках воно може бути значну й небезпечним, тоді машину необхідно зупинити для з'ясування й усунення причин іскріння. Однак невелике іскріння в машинах загального призначення звичайно припустимо.

2 Ступені іскріння

Відповідно до Держстандарту, іскріння на колекторі оцінюється ступенем іскріння (класом комутації) під краєм, що збігає, щітки.

Ступінь 1 - іскріння немає (темна комутація).

Ступінь 1^{1/4} — слабе іскріння під невеликою частиною щітки, не зухвалого почорніння колектора й появи нагару на щітках.

Ступінь 1^{1/2} — слабе іскріння під здебільшого щітки, що приводить до появи слідів почорніння на колекторі, усуває легко протиранням поверхні колектора бензином, і слідів нагару на щітках.

Степень 2 - іскріння під всім краєм щітки. Допускається тільки при короткочасних поштовхах навантаження й при перевантаженні. Приводить

до появи слідів почорніння на колекторі, усувають не протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках.

Ступінь 3 - значне іскріння під всім краєм щітки з появою великих іскор, що вилітають, що приводить до значного почорніння колектора, усуває не протиранням поверхні колектора бензином, а також до подгару й руйнування щіток. Допускається тільки для моментів прямого (безреостатного) включення або реверсування машин, якщо при цьому колектор і щітки залишаються в стані, придатному для подальшої роботи.

Якщо припустимий ступінь іскріння в паспорті електричної машини не зазначена, то при номінальному навантаженні вона не повинна перевищувати 11/2.

3 Проце комутації

При обертанні якоря машини постійного струму колекторні пластини по черзі вступають у зіткнення із щітками. При цьому перехід щітки з однієї пластини (сбегающей) на іншу (набегающую) супроводжується перемиканням секції обмотки з однієї паралельної галузі в іншу й зміною як значення, так і напрямку струму в цій секції. Процес перемикання секції з однієї паралельної галузі в іншу й супровідні його явища називаються комутацією.

Секція, у якій відбувається комутація, називається комутуючою, а тривалість процесу комутації - періодом комутації:

$$T_k = [60/(Kn)](b_{щ}/b_k)$$

де $b_{щ}$ — ширина щітки; $ДО$ — число колекторних пластин; n — частота обертання якоря, про/хв; b_k — відстань між серединами сусідніх колекторних пластин (колекторний розподіл).

Складність процесів комутації не дозволяє розглянути комутацію в загальному виді. Тому для одержання аналітичних і графічних залежностей, що пояснюють комутацію, допускають, що ширина щітки дорівнює колекторному розподілу; щітки розташовані на геометричній нейтралі; електричний опір комутуючої секції й місць її приєднання до колектора в порівнянні з опором перехідного контакту «щітка- колектор» пренебрежимо мало (звичайно таке співвідношення зазначених опорів відповідає дійсності).

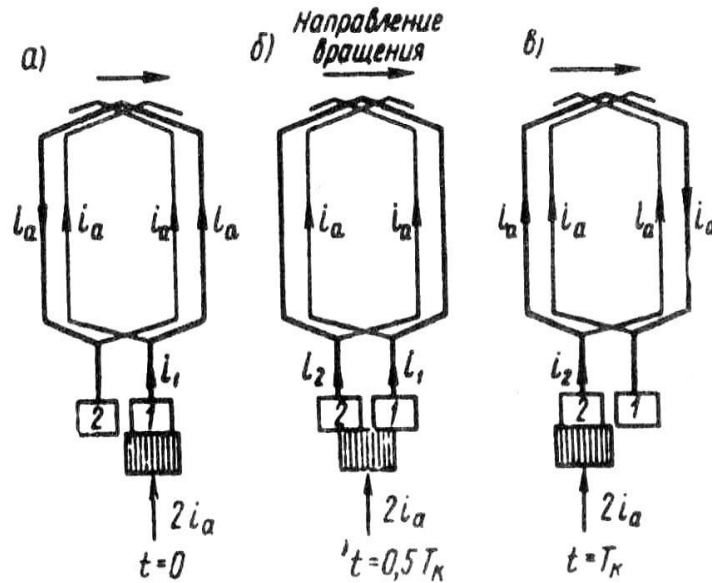


Рис. 27.1. Перехід комутуючої секції з однієї паралельної галузі в іншу

У початковий момент комутації (мал. 27.1, а) контактна поверхня щітки стосується тільки пластини 1, а комутуюча секція ставиться до лівої паралельної галузі обмотки й струм у ній дорівнює i_a . Потім пластина 1 поступово збігає із щітки й на зміну їй набігає пластина 2. У результаті комутуюча секція виявляється замкнутою щіткою й струм у ній поступово зменшується. У середині процесу комутації ($t = 0,5T_k$) контактна поверхня щітки рівномірно перекриває обидві колекторні пластини (мал. 27.1, б). Наприкінці комутації ($t = T_k$) щітка повністю переходить на пластину 2 і губить контакт із пластиною 1 (мал. 27.1, в), а струм у комутуючій секції стає рівним — i_a , тобто за значенням таким же, що й на початку комутації, а по напрямку — протилежним. При цьому комутуюча секція виявилася в правій паралельній галузі обмотки.

Самостійна робота №43

Тема: Заходи покращення комутації. Круговий вогонь по колектору.

Мета: ознайомитися із заходами покращення комутації та з методами запобігання кругового вогню по колектору.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Вибір щіток
- 2 Зменшення реактивної ЕРС
- 3 Застосування додаткових полюсів
- 4 Круговий вогонь по колектору

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Яка основна причина незадовільної комутації?
- 2 Опишіть, яким чином можна покращити комутацію за допомогою щіток?
- 3 Які є групи щіток електричних машин?
- 4 Якими методами можна зменшити реактивну складову ЕРС?
- 5 За допомогою чого можна скомпенсувати реактивну складову ЕРС?
- 6 Побудуйте графік зміни ЕРС в комутаційній секції в залежності від струму навантаження. Побудову поясніть.
- 7 Які недоліки застосування додаткових полюсів в електричних машинах?
- 8 У яких випадках виникає круговий вогонь по колектору? Як цьому запобігти?

1 Вибір щіток

Основна причина незадовільної комутації в машинах постійного струму - додатковий струм комутації

$$i_{\partial} = \sum e / \sum r_k \quad (27.17)$$

Тут $\sum r_k$ — сума електричних опорів додатковому струму комутації i_{∂} : опору місць пайки в петушках, перехідного контакту між колекторними пластинами й щіткою й властиво щітки.

Однак з перерахованих опорів, що входять в $\sum r_k$, найбільше значення має опір щітки й перехідного контакту, тому, позначивши їх $r_{щ}$, з деяким наближенням можна записати

$$i_{\partial} = \sum e / r_{щ} \quad (27-18)$$

З отриманого виразу бачимо, що зменшити струм i_{∂} , а отже поліпшити комутацію, можна або збільшенням опору $r_{щ}$, або зменшенням сумарної ЕРС $\sum e$ у комутуючій секції. Звідси випливає ряд способів поліпшення комутації, основні з яких розглянуті нижче.

З погляду забезпечення задовільної комутації доцільніше застосовувати щітки з більшим перехідним спаданням напруги в перехідному контакті й властиво щітці, тобто щітці з більшим опором $r_{щ}$. Однак припустима щільність струму в щітковому контакті цих щіток невелика, а тому їхнє застосування в машинах зі значним робочим струмом веде до необхідності збільшення площі щіткового контакту, що вимагає збільшення площі колектора за рахунок його довжини. Це привело б до збільшення габаритів машини й додатковій витраті міді. Тому щітки з більшим $r_{щ}$ застосовують переважно в машинах з відносно високою напругою, а отже, і з невеликим робочим струмом.

Щітки для електричних машин розділяють на чотири групи, що розрізняються сполукою, способом виготовлення й характеристиками (табл. 27.1). Вибирають щітки відповідно до рекомендацій, виробленими на підставі багаторічного досвіду проектування й експлуатації електричних машин. Найбільше застосування в машинах постійного струму напругою 110 - 440 В мають електрографітированые щітки.

Збільшенню перехідного опору щіткового контакту, а отже поліпшенню комутації, сприяє політура колектора - тонка оксидна плівка на поверхні колектора, що володіє підвищеним електричним опором.

2 Зменшення реактивної ЕРС

Істотний вплив на сумарну ЕРС у комутуючій секції робить реактивна ЕДС $e_p = e_1 + i_m$. ЕРС взаємоіндукції i_m у значній мірі залежить від ширини щітки: чим ширше щітка, тим більше число колекторних пластин перекриває вона одночасно, а отже, тим більше секцій одночасно комутирується, що викликає підвищення ЕРС взаємоіндукції i_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 розподіли.

Таблиця 27.1

Група щіток, позначення	Перехідне падіння напруги на парі щіток при номінальному струмі, В	Номінальна плітність струму, А/мм ²	Область застосування
Графітові Г, 611М	1,9—2,0	0,11—0,12	Для машин з полегшеними умовами комутації
Електрографітові ЕГ	2,0—2,7	0,10—0,15	Для машин із середніми й утрудненими умовами комутації й для контактних кілець
Вугільно-графітові УГ;Т	2,0	0,06-0,07	Для машин із середніми умовами комутації
Мідно-графітові М, МГ	0,2-1,5	0,15-0,20	Для низьковольтних (до 48В) машин і контактних кілець

Помітний вплив на реактивну ЕРС робить тип обмотки якоря. Так, якщо обмотку якоря виконати з укороченим кроком ($v_1 < \tau$), то активні сторони одночасно комутуючих секцій виявляться в різних пазах (див. мал. 27.3, б), що буде сприяти зменшенню ЕРС взаємоіндукції. Реактивна ЕДС може бути ослаблена зменшенням індуктивності секцій L_c . Для цього варто застосовувати в обмотці якоря секції з більшим числом витків ($L_c \equiv w_c$) і напівзакриті пази. Однак здійснення багатьох заходів привело б до створення громіздких і неекономічних машин. Тому при проектуванні машин постійного струму вибір зазначених параметрів зв'язують із прагненням одержати компактну й економічну машину. При цьому реактивна ЕДС може бути в значній мірі зменшена або навіть повністю усунута створенням у зоні комутації (по осі щіток) комутуючого поля певної полярності й величини. Створюється таке поле додатковими полюсами або зрушенням щіток геометричної нейтралі.

3 Застосування додаткових полюсів

Призначення додаткових полюсів – створити в зоні комутації магнітне поле такої величини й напрямку, щоб наводи цим полем у комутуючій секції ЕРС обертання $e_{вр}$ компенсувала реактивну ЕРС e_p . У машині постійного

струму без вживання заходів по поліпшенню комутації ЕРС e_p й $e_{вр}$ спрямовані в одну сторону, тобто діють згідно:

$$\sum e = e_p^{\rightarrow} + e_{вр}^{\rightarrow}.$$

Сумарна ЕРС у комутуючій секції $\sum e$ виявиться рівної нулю, якщо за допомогою додаткових полюсів створити в зоні комутації магнітне поле з магнітною індукцією B_k такої величини й напрямку, щоб ЕРС обертання $e_{вр}$ змінила свій напрямок на зворотне [див. (27.8)], а значення її було б дорівнює ЕРС реактивної e_p . У цьому випадку

$$\sum e = e_p^{\rightarrow} + e_{вр}^{\leftarrow} = 0.$$

і комутація стає прямолінійною (ідеальною).

Додаткові полюси розташовують між головними. При цьому щітки встановлюють на геометричній нейтралі.

Всі машини постійного струму потужністю понад 1 квт забезпечуються додатковими полюсами, число яких приймають рівним числу головних полюсів або ж удвічі меншим. Наявність додаткових полюсів дозволяє збільшити лінійне навантаження машини й при заданій потужності одержати машину меншої ваги й габаритів.

Число витків обмотки додаткових полюсів вибирають таким, щоб МРС додаткових полюсів компенсувала МРС якоря по поперечній осі в зоні комутації й мала деякий надлишок, необхідний для створення комутуючого поля з індукцією B_k , спрямованого протилежно полю реакції якоря (мал. 27.7). Виходячи із цього, МРС додаткового полюса для некомпенсованих машин постійного струму приймають рівної (А)

$$F_d = k_d F_a \quad (27.19)$$

де $k_d = F_d / F_a$ - коефіцієнт, що враховує необхідне перевищення МРС обмотки додаткового полюса F_d над МРС якоря F_a [див. (26.6)]. Для машин постійного струму сучасних серій цей коефіцієнт приймають рівним $k_d = 1,20 \div 1,45$.

Якщо машина постачена компенсаційною обмоткою, то МРС додаткових полюсів варто зменшити на величину МРС компенсаційної обмотки $F_{к.о.}$. Звичайно в компенсованих машинах постійного струму МРС додаткових полюсів на 15—30 % більше МРС якорі.

Якщо МРС додаткових полюсів зробити більше необхідного значення [див. (27.19)], то ЕРС обертання $e_{вр}$ стане більше реактивної ЕРС. У цьому випадку сумарна ЕРС змінить свій знак, а додатковий струм комутації - свій напрямок на протилежне в порівнянні з тим, яке він мав при криволінійній уповільненій комутації (див. мал. 27.4,6, крива 2).

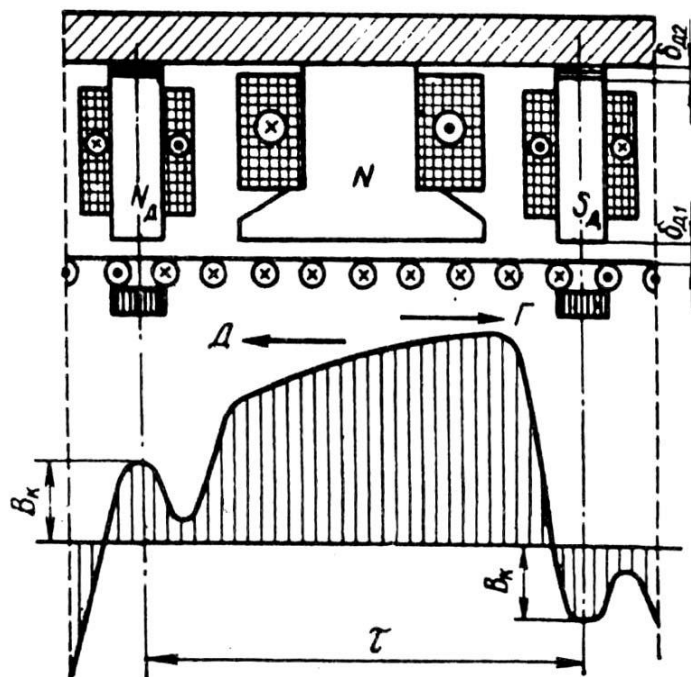


Рис. 27.7. Результуюче магнітне поле в повітряному зазорі машини з додатковими полюсами в генераторному (Г) і руховому (Д) режимах

Графік зміни результуючого струму комутації $i_2 = i_a + i_d$ у цьому випадку приймає вид, представлений на мал. 27.8, тобто комутація стає криволінійною прискореною, тому що струм у комутуючій секції досягає нульового значення за час $T < 0,5 T_k$ (крапка *b*). Для криволінійної прискореної комутації характерне підвищення щільності струму під краєм, що набігає, щітки (див. мал. 27.6, б). Порозумівається це тим, що при цьому виді комутації площа зіткнення пластини 2 із щіткою наростає повільніше, ніж збільшується струм $i_2 = i_a + i_d$. Найбільше значення щільності струму $v_2 \equiv \text{tg } \alpha_2$ відповідає початку періоду комутації ($t \approx 0$). При значних навантаженнях це може привести до іскріння під краєм, що набігає, щітки. Це порозумівається тим, що при прискореній комутації вихід пластини, що збігає, з-під щітки відбувається з розривом ланцюга додаткового струму комутації, що має напрямок, протилежний току вповільненої комутації.

Для забезпечення компенсації реактивної ЕРС при різних навантаженнях машини обмотку додаткових полюсів включають послідовно з обмоткою якоря. У цьому випадку МРС додаткових полюсів F_d при різних навантаженнях машини змінюється пропорційно току якоря I_a , тобто пропорційно МРС якоря F_a .

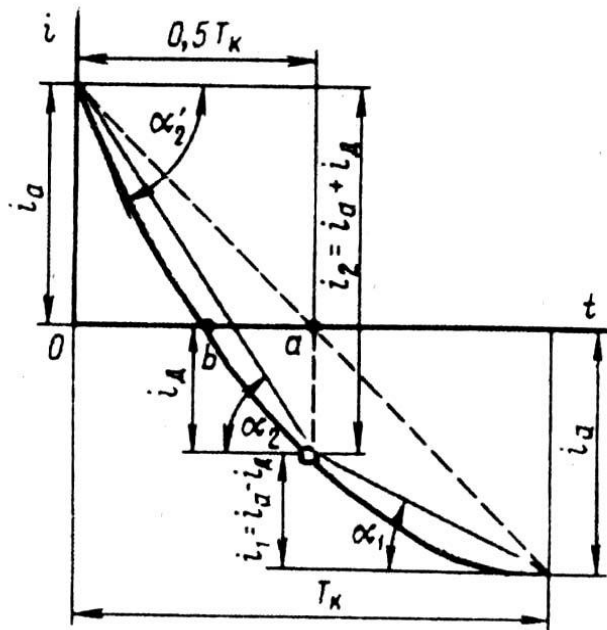


Рис. 27.8. Графік струму криволінійної прискореної комутації

Полярність додаткового полюса в генераторі повинна бути такою ж, як і у наступному по напрямку обертання головного полюса, а у двигуні - як у попереднього полюса (мал. 27.9).

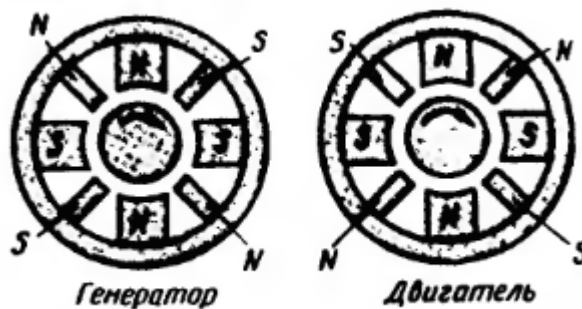


Рис. 27.9. Полярність додаткових полюсів при роботі машини генераторному й руховому режимах

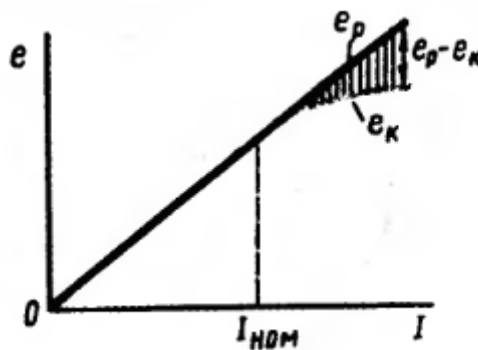


Рис. 27.10. Графік зміни ЕРС в комутуючій секції в залежності від струму навантаження

Додаткові полюси забезпечують задовільну комутацію в машині тільки в межах номінального навантаження.

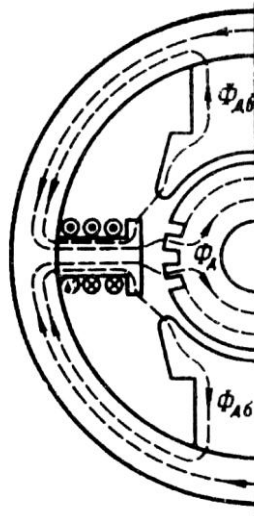


Рис. 27.11. До поняття про потік розсіювання додаткових полюсів

При перевантаженні машини відбувається насичення магнітного ланцюга додаткових полюсів. У цьому випадку реактивна ЕРС e_p змінюється пропорційно току навантаження, а ріст ЕРС зовнішнього поля через насичення магнітного ланцюга трохи затримується (мал. 27.10). У результаті в комутуючій секції з'являється сумарна ЕРС $\sum e = e_p - e_k$, тобто комутація стає вповільненою. Насиченню сердечників додаткових полюсів сприяє магнітний потік розсіювання $\Phi_{дс}$, що замикається через сердечники суміжних головних полюсів і станину (мал. 27.11). З метою зменшення магнітного потоку розсіювання, а отже, забезпечення більше лінійної залежності потоку додаткових полюсів від струму навантаження повітряний зазор додаткового полюса δ_d розділяють на два: один — між сердечником полюса і якорем $\delta_{д1}$, — а іншої між сердечником полюса й станиною $\delta_{д2}$ (див. мал. 27.7). В етім випадку зазор $\delta_{д2}$ обмежить значення потоку $\Phi_{дс}$. Зазор $\delta_{д2}$ створюється пакетом немагнітних прокладок, що закладають між сердечником полюса й станиною.

Одержання комутуючого поля зсувом щіток. У машинах постійного струму потужністю до 1 квт, виконуваних без додаткових полюсів, комутуюче поле в зоні комутації створюється зсувом щіток з геометричної нейтралі. Якщо щітки встановлені на геометричній нейтралі (мал. 27.12, а), то поперечне магнітне поле якоря з магнітною індукцією $B_{ақ}$ створює в зоні комутації індукцію B_k (мал. 27.12, б). У результаті в комутуючих секціях наводиться ЕРС обертання $e_{вр}$, спрямована узгоджено з реактивної ЕРС e_p і сприятливої вповільненої комутації. При зрушенні щіток на фізичну нейтраль mm' комутуюче поле з індукцією B_k зникає й ЕРС обертання $e_{вр} = 0$. При цьому в комутуючих секціях наводиться лише реактивна ЕРС e_p . Якщо ж щітки зрушити на кут β , тобто за фізичну нейтраль mm' (лінія $сс'$), те комутуюче

поле з індукцією B'_k змінить свій напрямок щодо напрямку при положенні щіток на геометричній нейтралі. Це поле буде наводити в комутуючих секціях ЕРС обертання, рівну реактивної ЕРС і протилежну їй по напрямку ($e_{вр} - e_p = 0$), тобто реактивна ЕРС виявиться скомпенсованою й комутація стане прямолінійною (ідеальною). Для одержання необхідного ефекту щітки варто зміщати в напрямку обертання якоря в генераторів або проти обертання якоря у двигунів.

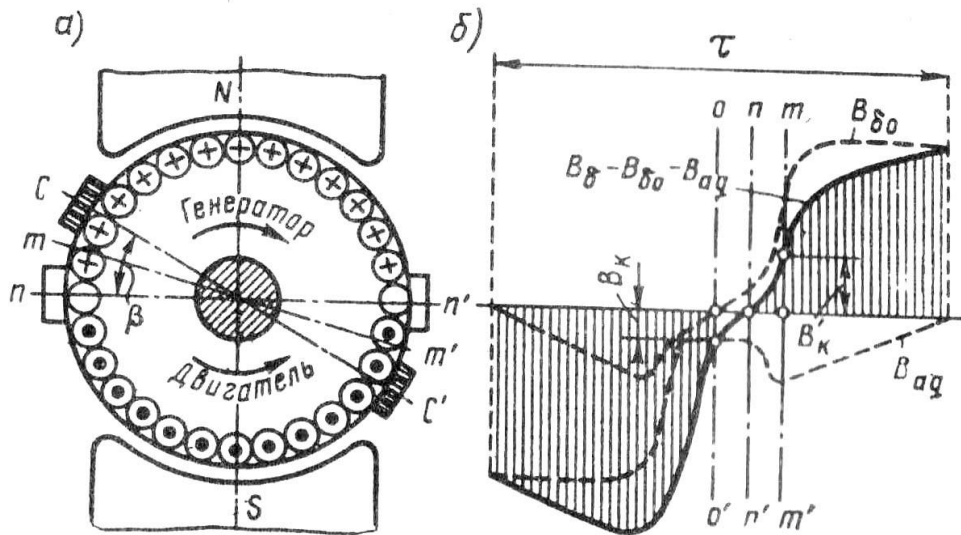


Рис. 27.12. Створення комутуючого поля зрушенням щіток

Описаний спосіб поліпшення комутації має наступні недоліки: а) комутуюче поле змінюється не пропорційно навантаженню машини, що виключає повну компенсацію реактивної ЕРС у всьому діапазоні навантажень, тому що для цього довелося б при кожній зміні навантаження міняти положення щіток (звичайно щітки встановлюють у фіксоване положення, що відповідає повної компенсації реактивної ЕРС при номінальному навантаженні); б) при зсуві щіток з геометричної нейтралі підсилюється дія, що розмагнічує, реакції якоря (див. мал. 26.5); в) для реверсирюемих машин зсув щіток з геометричної нейтралі неприпустимо, тому що необхідний напрямок зсуву фізичної нейтралі міняється зі зміною напрямку обертання якоря.

4 Круговий вогонь по колектору

При значних перевантаженнях або раптовому короткому замиканні машини постійного струму комутація здобуває різко вповільнений характер. У цьому випадку між колекторною пластиною, що збігає, і краєм, що збігає, щітки виникає електрична дуга. Так як колектор обертається, то дуга механічно розтягується (мал. 27.13, а). Поряд із цим перевантаження машини супроводжується посиленням реакції якоря, під дією якої розподіл індукції в повітряному зазорі машини стає не рівномірним (див.

мал. 26.4, в). У результаті напруга між сусідніми колекторними пластинами збільшується, перевищуючи припустимі межі. Це, з одного боку, може привести до виникнення електричних дуг між суміжними пластинами, а з іншого боку, поява високого потенціалу на деяких пластинах викликає різке підвищення напруги між щіткою й колекторними пластинами в міру їхнього видалення від краю, що збігає, щітки. Все це створює умови для виникнення електричної дуги між щіткою й колекторними пластинами.

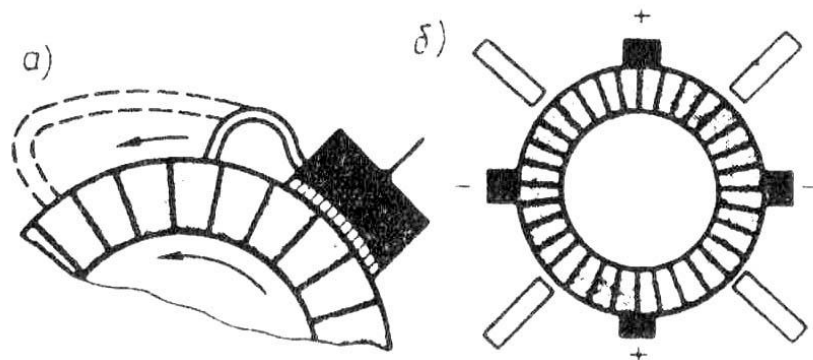


Рис. 27.13. Розтягання електричної дуги на обертовому колекторі (а) і розташування між щітками (б)

Таким чином, в умовах значного перевантаження в машині постійного струму з'являються комутаційні й потенційні причини для виникнення електричної дуги на колекторі. При цьому електричні дуги, викликані комутаційними причинами, зливаються з дугами, викликаними потенційними причинами, образуя навколо колектора потужну електричну дугу, що може перекинутися також і на корпус машини. Описане явище називається коловим вогнем по колекторі. Коловий вогонь дуже небезпечний, тому що може привести до важкої аварії машини, включаючи виникнення в машині пожежі.

Додаткові полюси й компенсаційна обмотка хоча й послабляють небезпеку виникнення колового вогню, але повністю її не усувають. Тому для захисту обмотки якоря від ушкодження електричною дугою у випадку виникнення колового вогню в електричних машинах, що працюють в умовах частих перевантажень, між колектором й обмоткою на якорі встановлюють ізолюючий екран. У деяких машинах застосовують повітряне дуття, сдувающее дугу убік підшипника, захищеного теплостійкою ізоляційною перегородкою. Для створення перешкоди на шляху поширення дуги між щітками різної полярності встановлюють бар'єри з ізоляційного матеріалу (мал. 27.13, б).

Самостійна робота №44

Тема: Колекторні генератори постійного струму. Генератори незалежного збудження.

Мета: ознайомитися з принципом дії колекторних генераторів постійного струму та з основними характеристиками генераторів незалежного збудження.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Колекторні генератори постійного струму. Основні поняття
- 2 Характеристика холостого ходу генератора незалежного збудження
- 3 Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження
- 4 Зовнішня та регулювальна характеристика генератора незалежного збудження

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Опишіть принцип дії навантаженого генератора постійного струму.
- 2 Запишіть рівняння напруг та потужностей для генератора постійного струму.
- 3 Побудуйте характеристику х.х. генератора постійного струму незалежного збудження. Побудову поясніть.
- 4 Побудуйте навантажувальну характеристику генератора постійного струму незалежного збудження. Побудову поясніть.
- 5 Побудуйте зовнішню характеристику генератора постійного струму незалежного збудження. Побудову поясніть.
- 6 Побудуйте регулювальну характеристику генератора постійного струму незалежного збудження. Побудову поясніть.

1 Колекторні генератори постійного струму. Основні поняття

У процесі роботи генератора постійного струму в обмотці якоря індукується ЕРС E_a . При підключенні до генератора навантаження в колі якоря виникає струм, а на виводах генератора встановлюється напруга, обумовлена рівнянням напруг для кола якоря генератора:

$$U = E_a - I_a \Sigma r. \quad (28.1)$$

Тут

$$\Sigma r = r_a + r_d + r_{к.о} + r_c + r_{щ} \quad (28.2)$$

— сума опорів всіх ділянок ланцюга якоря: обмотки якоря r_a , обмотки додаткових полюсів r_d , компенсаційної обмотки $r_{к.о}$, послідовної обмотки збудження r_c й перехідного щіткового контакту $r_{щ}$.

При відсутності в машині яких-небудь із зазначених обмоток в (28.2) не входять відповідні доданки.

Якір генератора приводиться в обертання приводним двигуном, що створює на валу генератора обертаючий момент M_1 . Якщо генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$), то для обертання його якоря потрібний порівняно невеликий момент холостого ходу M_0 . Цей момент обумовлений гальмовими моментами, що виникають у генераторі при його роботі в режимі х.х.: моментами від сил тертя й вихрових струмів у якорі.

При роботі навантаженого генератора в провадах обмотки якоря з'являється струм, що, взаємодіючи з магнітним полем порушення, створює на якорі електромагнітний момент M [див. (25.24)]. У генераторі цей момент спрямований зустрічно обертаючому моменту приводного двигуна ПД (мал. 28.1), тобто він є навантажувальним (гальмуючим).

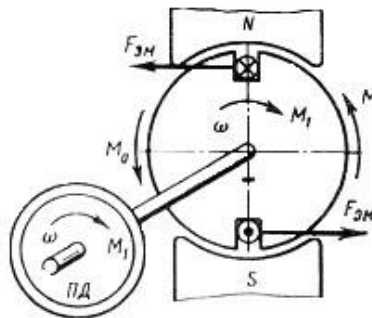


Рис. 28.1. Моменти, що діють у генераторі постійного струму

При незмінній частоті обертання ($n = const$) обертаючий момент приводного двигуна M_1 врівноважується сумою протидіючих моментів: моментом х.х. M_0 й електромагнітним моментом M , тобто

$$M_1 = M_0 + M. \quad (28.3)$$

Вираження (28.3) — рівняння моментів для генератора при $n = const$. Помноживши члени рівняння (28.3) на кутову швидкість обертання якоря ω , одержимо рівняння потужностей:

$$P_1 = P_0 + P_{\text{ЭМ}}, \quad (28.4)$$

де $P_1 = M_1\omega$ — подводимая від приводного двигуна до генератора потужність (механічна); $P_0 = M_0\omega$ — потужність х.х., тобто потужність, подводимая до генератора в режимі х.х. (при відключеному навантаженні); $P_{\text{ЭМ}} = M\omega$ — електромагнітна потужність генератора.

Згідно (25.27), одержимо

$$P_{\text{ЭМ}} = E_a I_a,$$

або з обліком (28.1)

$$P_{\text{ЭМ}} = UI_a + I_a^2 \sum r = P_2 + P_{\text{Эа}}, \quad (28.5)$$

де P_2 — корисна потужність генератора (електрична), тобто потужність, що віддає генератором навантаженню; $P_{\text{Эа}}$ — потужність втрат на нагрівання обмоток і щіткового контакту в ланцюзі якоря (див. § 29.8).

Враховуючи втрати на порушення генератора $P_{\text{Эв}}$, одержимо рівняння потужностей для генератора постійного струму:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{\text{Эа}} + P_{\text{Эв}}.$$

(28.6)

Отже, механічна потужність, що розвиває приводним двигуном P_1 , перетвориться в генераторі в корисну електричну потужність P_2 , передану навантаженню, і потужність, затрачану на покриття втрат ($P_0 + P_{\text{Эа}} + P_{\text{Эв}}$).

Тому що генератори звичайно працюють при незмінній частоті обертання, те їхньої характеристики розглядають за умови $n = \text{const}$. Розглянемо основні характеристики генераторів постійного струму.

Характеристика холостого ходу — залежність напруги на виході генератора в режимі х.х. U_0 від струму порушення I_B :

$$U_0 = f(I_B) \text{ при } I = 0 \text{ й } n = \text{const}.$$

Навантажувальна характеристика — залежність напруги на виході генератора U при роботі з навантаженням від струму порушення I_B :

$$U = f(I_B) \text{ при } I \neq 0 \text{ й } n = \text{const}.$$

Зовнішня характеристика — залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження I :

$$U = f(I) \text{ при } r_{\text{рз}} = \text{const} \text{ й } n = \text{const},$$

де $r_{\text{рз}}$ — регулювальний опір у ланцюзі обмотки збудження.

Регулювальна характеристика — залежність струму порушення I_B від струму навантаження I при незмінній напрузі на виході генератора:

$$I_B = f(I) \text{ при } U = \text{const} \text{ й } n = \text{const}.$$

Вид перерахованих характеристик визначає робочі властивості генераторів постійного струму.

2 Характеристика холостого ходу генератора незалежного збудження

Схема включення генератора незалежного порушення показана на мал. 28.2, а. Реостат r_{pc} , включений у ланцюг порушення, дає можливість регулювати струм I_B в обмотці збудження, а отже, і основний магнітний потік машини. Обмотка збудження харчується від джерела енергії постійного струму: акумулятора, випрямляча або ж іншого генератора постійного струму, називаного в цьому випадку збудником.

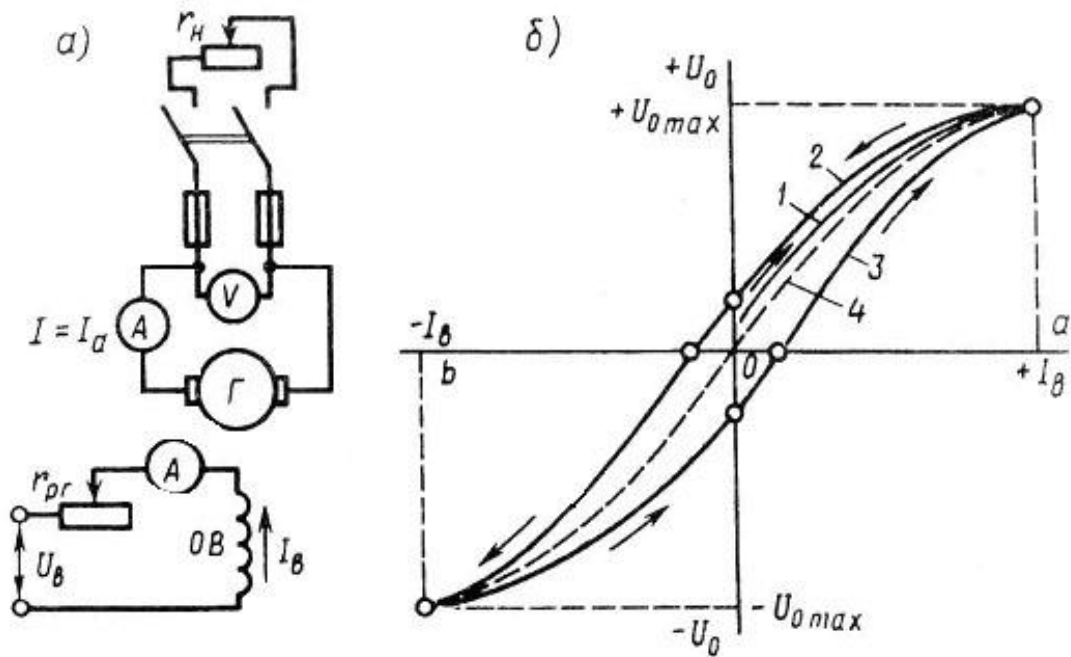


Рис. 28.2 Принципова схема (а) і характеристики х.х. (б) генератора незалежного порушення

При знятті характеристики $U_0 = f(I_B)$ генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$). Установивши номінальну частоту обертання й підтримуючи її незмінної, поступово збільшують струм в обмотці збудження I_B від нульового значення до $+I_B = Oa$, при якому напруга х.х. $U_0 = 1,15U_{ном}$. Одержують дані для побудови кривій 1 (мал. 28.2, б). Початкова ордината кривій 1 не дорівнює нулю, що порозумівається дією невеликого магнітного потоку залишкового магнетизму, що зберігся від попереднього намагнічування машини. Зменшивши струм порушення до нуля, і змінивши його напрямку, поступово збільшують струм у ланцюзі порушення до $-I_B = Ob$. Отримана в такий спосіб крива 2 називається *спадною галуззю характеристики*. У першому квадранті крива 2 розташовується вище кривій 1. Порозумівається це тим, що в процесі зняття кривій 1 відбулося збільшення магнітного потоку залишкового намагнічування. Далі досвід проводять у зворотному напрямку, тобто зменшують струм порушення від $-I_B = Ob$ до $I_B = 0$, а потім збільшують його до значення $+I_B = Oa$. У результаті одержують криву 3, називану *висхідною галуззю характеристики* х.х. Спадна й висхідна галузі характеристики х.х.

утворюють петлю намагнічування. Провівши між кривими 2 й 3 середню лінію 4, одержимо розрахункову характеристику х.х.

Прямолінійна частина характеристики х.х. відповідає ненасиченій магнітній системі машини. При подальшому збільшенні струму сталь машини насичується й характеристика здобуває криволінійний характер. Залежність $U_0 = f(I_B)$ повторює в іншому масштабі магнітну характеристику машини (див. § 26.1) і дає можливість судити про магнітні властивості машини.

3 Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Ця характеристика виражає залежність напруги U на виході генератора від струму порушення I_B при незмінних струмі навантаження, наприклад номінальному, і частоті обертання. При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС [див. (28.1)], тому навантажувальна характеристика I розташовується нижче характеристики холостого ходу 2 (мал. 28.3). Якщо із точки a , що відповідає номінальній напрузі $U_{ном}$, відкласти нагору відрізок ab , рівний $I_a \Sigma r$, і провести горизонтально відрізок bc до перетинання з характеристикою х.х., а потім з'єднати точки a й c , то одержимо abc — трикутник реактивний (характеристичний).

Так, при роботі генератора в режимі х.х. при струмі порушення $I_{B1} = I_{B.ном}$ напруга на виводах $U_0 = de$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі порушення) напруга генератора знизиться до значення $U_{ном} = ae$. Таким чином, відрізок da виражає значення напруги $\Delta U = U_0 - U_{ном}$ при $I_{B1} = I_{B.ном}$. Напруга на виводах генератора в цьому випадку зменшилася в результаті дії двох причин: спадання напруги в ланцюзі якоря [див. (28.1)] і впливу, що розмагнічує, реакції якоря. Вимірявши значення опору ланцюга якоря й підрахувавши спадання напруги $I_a \Sigma r$, можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження: $E_a = U + I_a \Sigma r$. На мал. 28.3 ця ЕРС представлена відрізком be . Електрорушійна сила генератора при навантаженні менше, ніж у режимі х.х. ($be < de$), що порозумівається впливом, що розмагнічує, реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу із точки c опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис. Отриманий відрізок cf являє собою ЕРС генератора при навантаженні; у режимі х.х. для створення цієї ЕРС необхідний струм порушення $I_{B2} < I_{B1}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів порушення $I_{B1} - I_{B2}$, являє собою струм порушення, що компенсує вплив, що розмагнічує, реакції якоря.

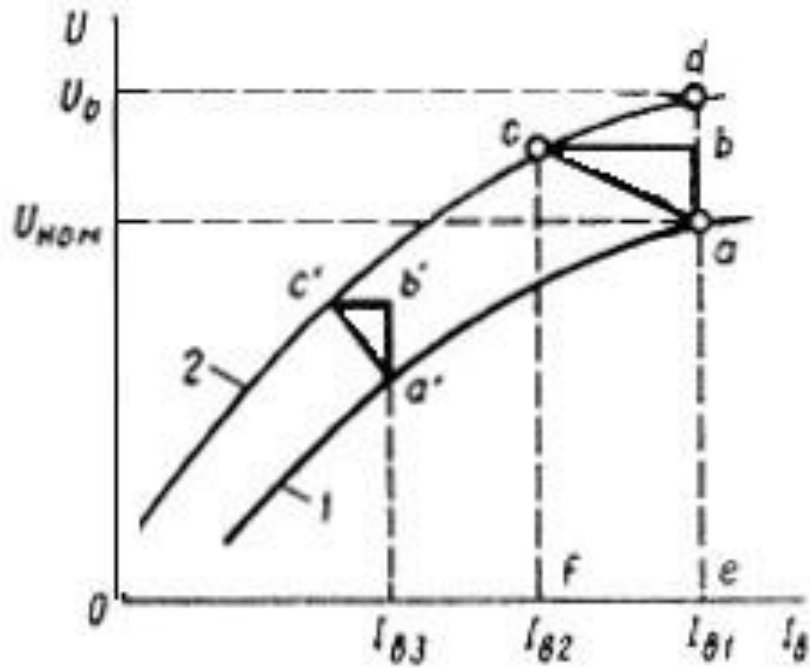


Рис. 28.3. Навантажувальна характеристика генератора незалежного порушення

Катети реактивного трикутника кількісно визначають причини, що викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: спадання напруги в ланцюзі якоря визначає катет

$$ab = I_a \Sigma r \quad (28.7)$$

струм порушення $I_{B1} - I_{B2}$, що компенсує дію, що розмагнічує, реакції якоря, визначає катет

$$bc = I_{B1} - I_{B2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2\omega_{B.K}}, \quad (28.8)$$

де F_{qd} й F_{ad} — величини, що визначають дію, що розмагнічує, реакції якоря по поперечній і поздовжній осях (див. § 26.2); $\omega_{B.K}$ -число витків у полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник $a'b'c'$ побудований для іншого значення струму порушення I_{B3} . Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінною ($a'b' = ab$), що порозумівається незмінністю струму навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася ($b'c' < bc$), тому що при меншому струмі порушення зменшився ступінь насичення магнітного ланцюга генератора, а отже, і дія, що розмагнічує, реакції якоря.

4 Зовнішня та регульовальна характеристика генератора незалежного збудження

Ця характеристика являє собою залежність напруги U на виводах генератора від струму навантаження I . При знятті даних для побудови

зовнішньої характеристики генератор приводять в обертання з номінальною швидкістю й навантажують його до номінального струму при номінальній напрузі. Потім, поступово зменшуючи навантаження аж до х.х. ($I = 0$), знімають показання приладів. Опір ланцюга порушення r_B й частоту обертання протягом досвіду підтримують незмінними.

На мал. 28.4, а представлена зовнішня характеристика генератора незалежного порушення, з якої видно, що при збільшенні струму навантаження I напруга на виводах генератора знижується; це порозумівається впливом, що розмагнічує, реакції якоря й спаданням напруги в ланцюзі якоря. Нахил зовнішньої характеристики до осі абсцис (твердість зовнішньої характеристики) оцінюється *номінальною зміною напруги генератора при скиданні навантаження*:

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\% . \quad (28.9)$$

Звичайно для генератора незалежного порушення $\Delta U_{ном} = 5 \div 10\%$.

Регульовальна характеристика. Характеристика $I_B = f(I)$ показує, як варто міняти струм у ланцюзі порушення, щоб при змінах навантаження генератора напруга на його виводах залишалася незмінною, рівною номінальній. При цьому частота обертання зберігається постійною ($n = const$) .

При роботі генератора без навантаження в ланцюзі порушення встановлюють струм I_{B0} , при якому напруга на виводах генератора стає рівною номінальній. Потім поступово збільшують навантаження генератора, одночасно підвищують струм порушення таким чином, щоб напруга генератора у всьому діапазоні навантажень залишалася рівною номінальній. Так одержують висхідну галузь характеристики (крива 1 на мал. 28.4, б). Поступово зменшуючи навантаження генератора до х.х. і регулюючи відповідним чином струм порушення, одержують спадну галузь характеристики (крива 2 на мал. 28.4, б). Спадна галузь регульовальної характеристики розташована нижче висхідної, що порозумівається впливом зрослого залишкового намагнічування магнітного ланцюга машини в процесі зняття висхідної галузі. Середню криву 3, проведену між висхідною й спадною галузями, називають *практичною регульовальною характеристикою генератора*.

Основний недолік генераторів незалежного порушення - це необхідність у стороннім джерелі енергії постійного струму - збуднику. Однак можливість регулювання напруги в широких межах, а також порівняно тверда зовнішня характеристика цього генератора є його достоїнствами.

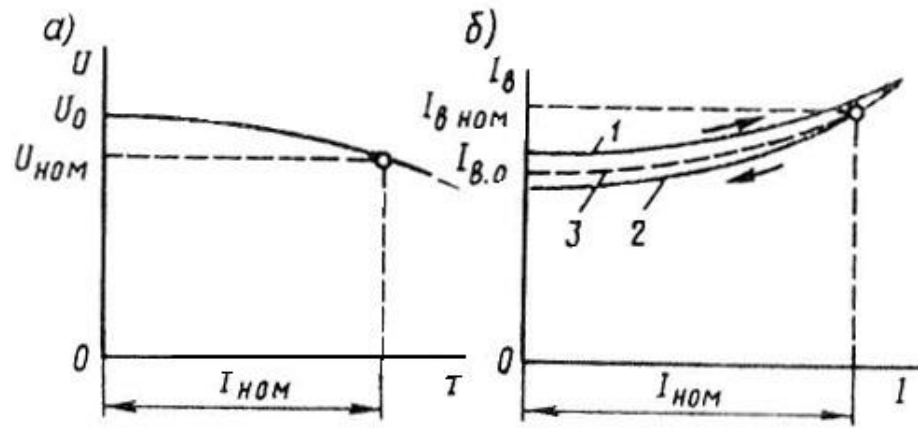


Рис. 28.4. Зовнішня (а) і регулювальна (б) характеристики генератора незалежного порушення

Самостійна робота №45

Тема: Генератори паралельного та змішаного збудження.

Мета: ознайомитися з принциповою схемою генератора паралельного та змішаного збудження та з їх основними характеристиками.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Генератор паралельного збудження
- 2 Генератор змішаного збудження

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 На чому заснований принцип самозбудження генератора постійного струму?
- 2 Зарисуйте схему ввімкнення генератора паралельного збудження.
- 3 Зарисуйте характеристики х.х. генератора паралельного збудження. Поясніть їх побудову.
- 4 Зарисуйте характеристику самозбудження генератора постійного струму, проаналізуйте її.
- 5 Зарисуйте зовнішню характеристику генератора паралельного збудження та проаналізуйте її.
- 6 Зарисуйте схему ввімкнення генератора змішаного збудження та його зовнішні характеристики. Дайте їх аналіз.

1 Генератор паралельного збудження

Принцип самозбудження генератора постійного струму заснований на тім, що магнітна система машини, будучи намагніченою, зберігає тривалий час невеликий магнітний потік залишкового магнетизму сердечників полюсів і станини Φ_{ocm} (порядку 2—3% від повного потоку). При обертанні якоря потік індукує у якірній обмотці ЕРС E_{ocm} , під дією якої в обмотці збудження виникає невеликий струм $I_{в.о.с.т.}$. Якщо МРС обмотки збудження $I_{в.о.с.т.}w_B$ має такий же напрямок, як і потік Φ_{ocm} , то вона збільшує потік головних полюсів. Це, у свою чергу, викликає збільшення ЕРС генератора, отчий струм порушення знову збільшиться. Так буде тривати доти, поки напруга генератора не буде врівноважено спаданням напруги в ланцюзі порушення, тобто $I_B r_B = U_0$.

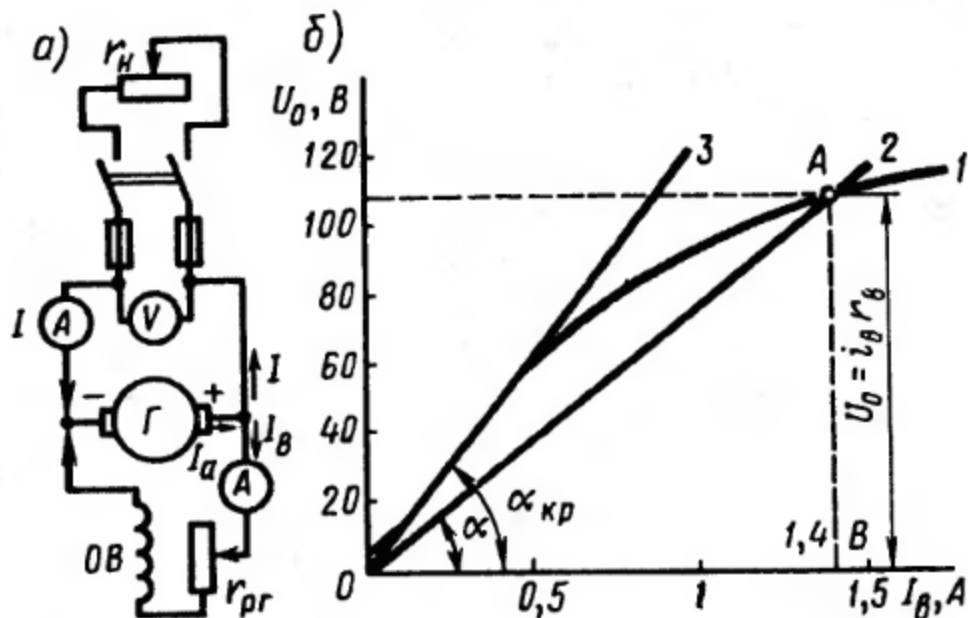


Рис. 28.5. Принципова схема (а) і характеристика х.х. (б) генератора паралельного збудження

На мал. 28.5, а показана схема включення генератора паралельного порушення, на мал. 28.5, б — характеристика х.х. генератора (крива 1) і залежність спадання напруги від струму порушення $I_B r_B = f(I_B)$ (пряма 2). Кривка перетинання А відповідає закінченню процесу самозбудження, тому що саме в ній $U_0 = I_B r_B$.

Кут нахилу прямиї OA до осі абсцис визначається із трикутника OAB :

$$\frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_0}{I_B} = r_B, \quad (28.10)$$

де m_i — масштаб струму (по осі абсцис), А/мм; m_u — масштаб напруги (по осі ординат), В/мм.

З (28.10) бачимо, що кут нахилу прямиї $I_B r_B = f(I_B)$ до осі абсцис прямо пропорційний опору ланцюга порушення. Однак при деякому значенні опору

реостата r_{pz} опір r_B , досягає значення, при якому залежність $I_B r_B = f(I_B)$ стає дотичною до прямолінійної частини характеристики х.х. (пряма 3). У цих умовах генератор не самозбуджується. Опір ланцюга порушення, при якій припиняється самозбудження генератора, називають *критичним опором*, ($r_{в.крит}$).

Слід зазначити, що самозбудження генератора можливо лише при частоті обертання, що перевищує критичну $n_{кр}$. Ця умова впливає з *характеристики самозбудження генератора* (мал. 28.6), що представляє собою залежність напруги генератора в режимі х.х. від частоти обертання при незмінному опорі ланцюга порушення, тобто $U_0 = f(n)$ при $r_B = const$.

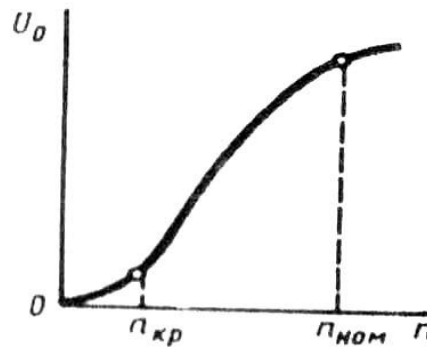


Рис. 28.6. Характеристика самозбудження

Аналіз характеристики самозбудження показує, що при $n < n_{кр}$ збільшення частоти обертання якоря генератора супроводжується незначним збільшенням напруги, тому що процесу самозбудження немає й поява напруги на виході генератора обумовлено лише залишковим намагнічуванням магнітного ланцюга генератора. Процес самозбудження починається при $n > n_{кр}$. У цьому випадку збільшення частоти обертання супроводжується різким ростом напруги U_0 . Однак при частоті обертання, близької до номінального, ріст напруги трохи сповільнюється, що порозумівається магнітним насиченням генератора. Критична частота обертання залежить від опору ланцюга порушення й з ростом останнього збільшується.

Таким чином, самозбудження генераторів постійного струму можливо при дотриманні наступних умов: а) магнітна система машини повинна мати залишковий магнетизм; б) приєднання обмотки збудження повинне бути таким, щоб МРС обмотки збігалася по напрямку з потоком залишкового магнетизму $\Phi_{ост}$; в) опір ланцюга порушення повинне бути менше критичного; г) частота обертання якоря повинна бути більше критичної.

Тому що генератор паралельного порушення самозбуджується лише в одному напрямку, те й характеристика х.х. цього генератора може бути знята тільки для одного квадранта осей координат.

Навантажувальна й регульовальна характеристики генератора паралельного порушення практично не відрізняються від відповідних характеристик генератора незалежного порушення.

Зовнішня характеристика генератора паралельного порушення I (мал. 28.7) менш тверда, чим у генератора незалежного порушення. Порозумівається це тим, що в генераторі паралельного порушення крім причин, що викликають зменшення напруги в генераторі незалежного порушення (реакція якоря й спадання напруги в ланцюзі якоря), діє ще й третя причина — зменшення струму порушення, викликане зниженням напруги від дії перших двох причин. Цим же порозумівається й те, що при поступовому зменшенні опору навантаження r_n струм збільшується лише до критичного значення $I_{кр}$, а потім при подальшому зменшенні опору навантаження струм починає зменшуватися. Нарешті, струм навантаження при короткому замиканні $I_k < I_{кр}$. Справа в тому, що зі збільшенням струму підсилюється розмагнічування генератора (посилення реакції якоря й зменшення струму порушення), машина переходить у *ненасичений* стан, при якому навіть невелике зменшення опору навантаження викликає різке зменшення ЕДС машини (див. мал. 28.5, б). Тому що струм визначається напругою на виводах генератора U й опором навантаження r_n , тобто $I = U / r_n$, те при струмах навантаження $I < I_{кр}$, коли напруга генератора зменшується повільніше, ніж убуває опір навантаження, відбувається ріст струму навантаження. Після того як $I = I_{кр}$, подальше зменшення r_n супроводжується зменшенням струму навантаження, тому що в цьому випадку напруга U убуває швидше, ніж зменшується опір навантаження r_n .

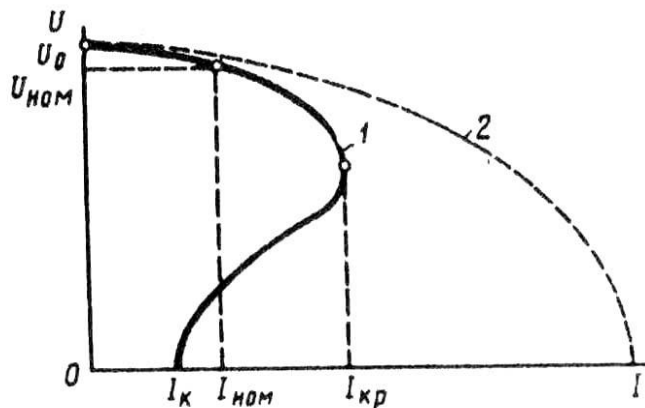


Рис. 28.7. Зовнішня характеристика генератора паралельного порушення

Таким чином, коротке замикання, викликане повільним зменшенням опору навантаження, не небезпечно для генератора паралельного порушення. Але при раптовому к. з. магнітна система генератора не встигає розмагнітитися й струм I_k досягає небезпечних для машини значень $I_k = (8 \div 12)I_{ном}$ (крива 2). При такому різкому зростанні струму навантаження на валу генератора виникає значний гальмуючий момент [див. (25.24)], а на колекторі з'являється сильне іскріння, що переходить у коловий вогонь. Тому

необхідно захищати генератор від перевантаження й к.з. за допомогою плавких запобіжників або ж застосуванням релейного захисту.

Генератори паралельного порушення широко застосовують в установках постійного струму, тому що відсутність збудника вигідно відрізняє ці генератори від генераторів незалежного порушення. Номінальна зміна напруги генератора паралельного порушення [див. (28.9)] становить 10-30%.

2 Генератор змішаного збудження

Генератор змішаного порушення (мал. 28.8, а) має паралельну й послідовну обмотки збудження. Потік порушення створюється в основному паралельною обмоткою. Послідовна обмотка звичайно включається згідно з паралельною (щоб МДС обмоток склалися), що забезпечує одержання твердої зовнішньої характеристики генератора.

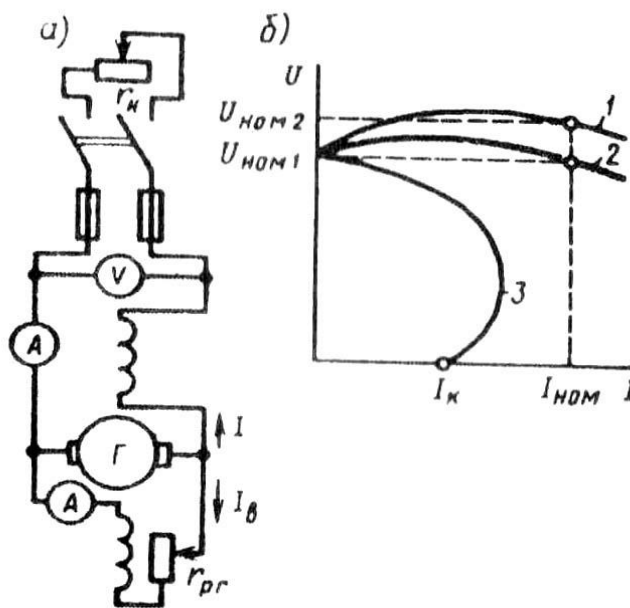


Рис. 28.8. Схема включення генератора змішаного порушення (а) і його зовнішні характеристики (б)

У режимі х.х. генератор має тільки паралельне порушення, тому що $I = 0$. З появою навантаження виникає МРС послідовної обмотки збудження, що, подмагничивая машину, компенсує дія, що розмагнічує, реакції якоря й спадання напруги в якорі.

Зовнішня характеристика в цьому випадку стає найбільш твердою (мал. 28.8, б, крива 2), тобто напруга на затискачах генератора при збільшенні струму залишається майже незмінним. Якщо ж потрібно, щоб напруга на затискачах споживача (наприкінці лінії) залишалася практично незмінним, то число витків послідовної обмотки збільшують так, щоб МРС цієї обмотки компенсувала ще й спадання напруги в проводах лінії (крива 1).

При зустрічному включенні обмоток збудження напруга генератора з ростом струму навантаження різко зменшується (крива 3), що порозумівається дією, що розмагнічує, послідовної обмотки збудження, МРС якої спрямована проти МРС паралельної обмотки. Зустрічне включення обмоток застосовують

лише в генераторах спеціального призначення, наприклад у зварювальних, де необхідно одержати круто падаючу зовнішню характеристику.

Генератори змішаного порушення з погодженим включенням обмоток збудження застосовують для живлення силового навантаження у випадках, коли потрібне сталість напруги в лінії.

Самостійна робота №46

Тема: Двигуни паралельного збудження. Імпульсне регулювання частоти обертання.

Мета: вивчити схему ввімкнення в мережу двигуна паралельного збудження, ознайомитися з його основними характеристиками та з методом імпульсного регулювання частоти обертання.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Схема ввімкнення в мережу двигуна паралельного збудження та його робочі характеристики
- 2 Механічні характеристики двигуна паралельного збудження
- 3 Імпульсне регулювання частоти обертання двигуна паралельного збудження

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Зарисуйте принципову схему ввімкнення в мережу двигуна паралельного збудження.
- 2 Чим визначаються експлуатаційні властивості двигуна паралельного збудження?
- 3 Зарисуйте робочі характеристики двигуна паралельного збудження. Проаналізуйте їх.
- 4 Що таке номінальна зміна частоти обертання? Як вона визначається?
- 5 Побудуйте механічні характеристики двигуна паралельного збудження. Проаналізуйте їх.
- 6 В чому полягає суть імпульсного методу регулювання частоти обертання двигуна паралельного збудження?

1 Схема ввімкнення в мережу двигуна паралельного збудження та його робочі характеристики

Схема включення в мережу двигуна паралельного збудження показана на мал. 29.3, а. Характерною рисою цього двигуна є те, що струм в обмотці збудження (ОВ) не залежить від токовища навантаження (токовища якоря). Реостат у колі збудження r_{p2} служить для регулювання токовища в обмотці збудження й магнітного потоку головних полюсів.

Експлуатаційні властивості двигуна визначаються його *робочими характеристиками*, під якими розуміють залежність частоти обертання n , токовища I , корисного моменту M_2 , що обертає моменту M від потужності на валу двигуна P_2 при $U = const$ й $I_b = const$ (мал. 29.3, б).

Для аналізу залежності й $n = f(P_2)$, що звичайно називають швидкісною характеристикою, звернемося до формули (29.5), з якої видно, що при незмінній напрузі U на частоту обертання впливають два фактори: спадання напруги в ланцюзі якоря $I_a \Sigma r$ й потік збудження Φ . При збільшенні навантаження зменшується чисельник $(U - I_a \Sigma r)$, при цьому внаслідок реакції якоря зменшується й знаменник Φ . Звичайне ослаблення потоку, викликане реакцією якоря, невеликий і перший фактор впливає на частоту обертання сильніше, чим другий. У підсумку частота обертання двигуна з ростом навантаження P_2 зменшується, а графік $n = f(P_2)$ здобуває падаючий вид з невеликою опуклістю, зверненої до осі абсцис. Якщо ж реакція якоря у двигуні супроводжується більше значним ослабленням потоку Φ , то частота обертання зі збільшенням навантаження буде зростати, як це показано штрихової кривої на мал. 29.3, б. Однак така залежність $n = f(P_2)$ є небажаною, тому що вона, як правило, не задовольняє умові усталеної роботи двигуна: з ростом навантаження на двигун зростає частота обертання, що веде до додаткового росту навантаження й т.д., тобто частота обертання n двигуна необмежено збільшується й двигун іде «у рознос». Щоб забезпечити характеристиці частоти обертання форму падаючій кривій, у деяких двигунах паралельного збудження застосовують легку (з невеликим числом витків) послідовну обмотку збудження, що називають *стабілізуючою обмоткою*. При включенні цієї обмотки узгоджено з паралельною обмоткою збудження її МДС компенсує дія, що розмагнічує, реакції якоря так, що потік Φ у всьому діапазоні навантажень залишається практично незмінним.

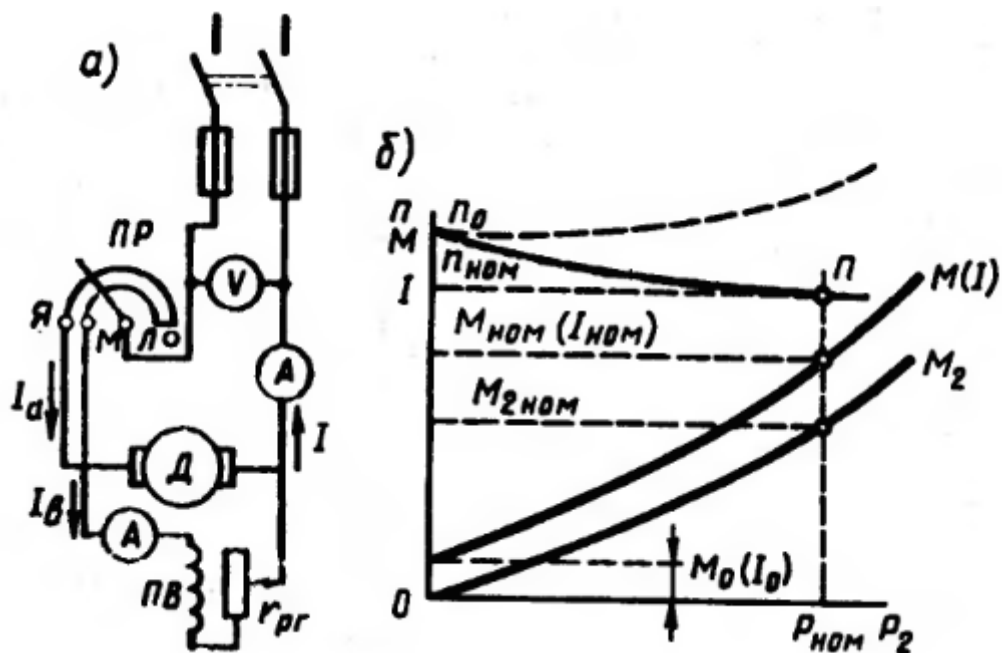


Рис. 29.3. Схема двигуна паралельного збудження (а) і його робочі характеристики (б)

Зміна частоти обертання двигуна при переході від номінального навантаження до х.х., виражене у відсотках, називають *номінальною зміною частоти обертання*:

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (29.8)$$

де n_0 — частота обертання двигуна в режимі х.х.

Звичайно для двигунів паралельного збудження $\Delta n_{\text{ном}} = 2 \div 8\%$, тому характеристику частоти обертання двигуна паралельного збудження називають *твердою*.

2 Механічні характеристики двигуна паралельного збудження

Залежність корисного моменту M_2 від навантаження встановлена формулою $M_2 = 9,55 P_2 / n$. При $n = \text{const}$ графік $M_2 = f(P_2)$ мав би вид прямої. Однак зі збільшенням навантаження частота обертання двигуна знижується, і тому залежність $M_2 = f(P_2)$ криволинейна.

При $n = \text{const}$ обертаючий момент двигуна $M = M_0 + M_2$. Тому що робочі характеристики двигуна будують за умови $I_B = \text{const}$, що забезпечує сталість магнітних втрат у двигуні, то момент х.х. $M_0 = \text{const}$. Тому графік залежності $M = f(P_2)$ проходить паралельно кривій $M_2 = f(P_2)$. Якщо прийняти потік $\Phi = \text{const}$, то графік $M_2 = f(P_2)$ є в той же час вираженням залежності $I = f(P_2)$, тому що $M = c_M \Phi I_a$.

Для одержання аналітичного вираження *механічної характеристики* $n = f(M)$ перетворимо вираження (29.5):

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \sum r}{c_e \Phi}; \quad (29.9)$$

підставивши в нього з (25.24) значення токовища якоря

$$I_a = M / (c_M \Phi), \quad (29.10)$$

одержимо

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum r}{c_e c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (29.11)$$

де n_0 — частота обертання в режимі х.х.; Δn — зміна частоти обертання, викликана зміною навантаження на валу двигуна.

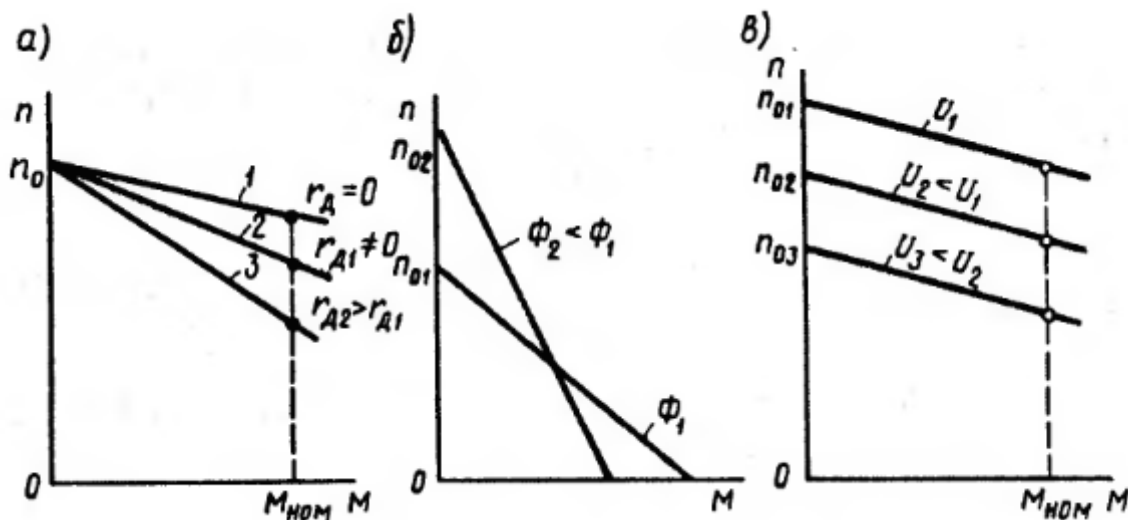


Рис. 29.4. Механічні характеристики двигуна паралельного збудження:
 а — при введенні в ланцюг якоря додаткового опору;
 б — при зміні основного магнітного потоку;
 в - при зміні напруги в ланцюзі якоря

Якщо зневажити реакцією якоря, то (тому що $I_B = const$) можна прийняти $\Phi = const$. Тоді механічна характеристика двигуна паралельного збудження являє собою пряму лінію, трохи нахилена до осі абсцис (мал. 29.4, а). Кут нахилу механічної характеристики тим більше, чим більше значення опору, включеного в ланцюг якоря. Механічну характеристику двигуна при відсутності додаткового опору в ланцюзі якоря називають *природною* (пряма 1). Механічні характеристики двигуна, отримані при введенні додаткового опору в ланцюг якоря, називають *штучними* (прямі 2 й 3).

Вид механічної характеристики залежить також і від значення основного магнітного потоку Φ . Так, при зменшенні Φ збільшується частота обертання х.х. n_0 й одночасно збільшується Δn , тобто збільшуються обое складають уравнения, що (29.11). Це приводить до різкого збільшення нахилу механічної характеристики, тобто до зменшення її твердості (мал. 29.4, б).

Прі зміні напруги на якорі U міняється частота обертання n_0 , а n_0 залишається незмінної. У підсумку твердість механічної характеристики (якщо зневажити впливом реакції якоря) не міняється (мал. 29.4, в), тобто

характеристики зміщуються по висоті, залишаючись паралельними один одному.

3 Імпульсне регулювання частоти обертання двигуна паралельного збудження

Сутність цього способу регулювання ілюструється схемою, зображеної на мал. 29.7, а. Ланцюг обмотки якоря двигуна паралельного (незалежного) збудження періодично переривається ключем K . Під час замикання ланцюга якоря на час t до обмотки якоря підводить напруга $U = U_{umt}$ й токовище в ній досягає значення $I_{a\max}$. Потім ключем Do ланцюг якоря розмикають і токовище в ній убуває, досягаючи до моменту наступного замикання ланцюга значення $I_{a\min}$ (при розмиканні ключа Do токовище в обмотці якоря замикається через діод VD). При наступному замиканні ключа Do токовище досягає значення $I_{a\max}$ й т.д. Таким чином, до обмотки якоря підводить деяка середня напруга

$$U_{cp} = Ut/T = \alpha U, \quad (29.13)$$

де T -- відрізок часу між двома наступними один за одним імпульсами напруги (мал. 29.7, б); $\alpha = t/T$ — коефіцієнт керування.

При цьому в обмотці якоря проходить токовище, середнє значення якого $I_{acp} = 0,5(I_{a\max} + I_{a\min})$.

При імпульсному регулюванні частота обертання двигуна

$$n = \frac{\alpha U - I_{acp} \sum r}{c_e \Phi}. \quad (29.14)$$

Таким чином, імпульсне регулювання частоти обертання аналогічно регулюванню зміною подводимого до ланцюга якоря напруги. З метою зменшення пульсацій токовища в ланцюзі якоря включена котушка індуктивності (дросель) L , а частота подачі імпульсів дорівнює 200—400 Гц.

На мал. 29.7, у представлена одна з можливих схем імпульсного регулювання, де як ключ застосований керований діод — тиристор VS . Відкривається тиристор подачею короткочасного імпульсу від генератора імпульсів (ГІ) на керуючий електрод (УЭ) тиристора. Ланцюг L_1C , шунтувальний тиристор, служить для запирання останнього в період між двома керуючими імпульсами. Відбувається це в такий спосіб: при відкриванні тиристора конденсатор Z перезаряджається через контур L_1C і створює на силових електродах тиристора напруга, зворотна напрузі мережі, що припиняє протікання токовища через тиристор. Параметрами ланцюга L_1C визначається час (с) відкритого стану тиристора: $t = \pi\sqrt{L_1C}$. Тут L_1 виражається в генрі (Гн); Z — у фарадах (Ф).

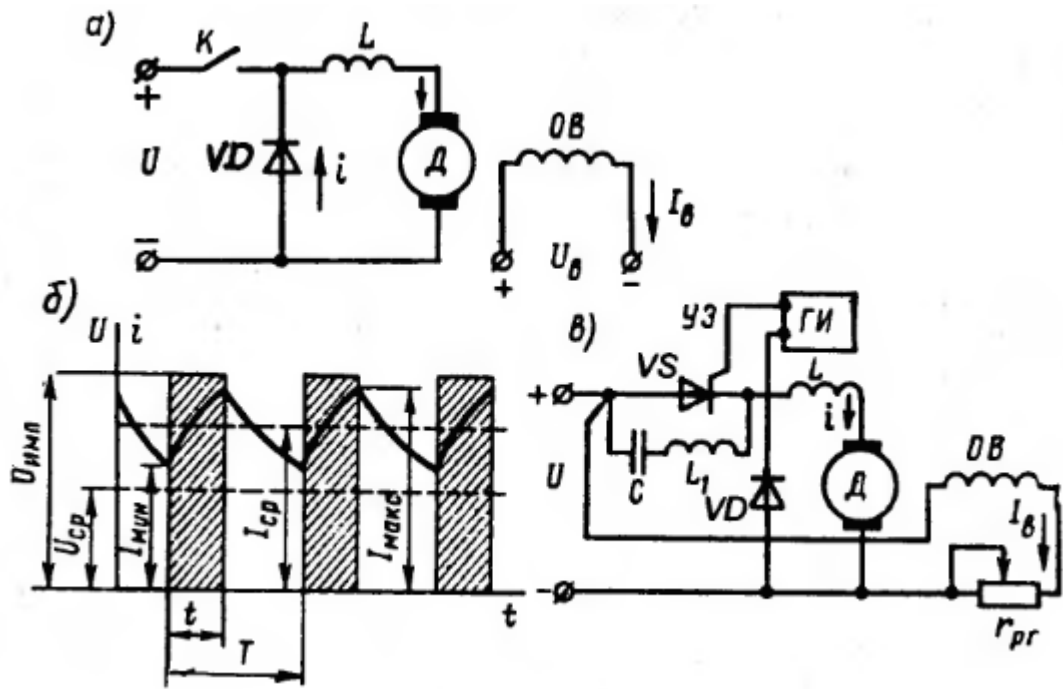


Рис. 29.7. Імпульсне регулювання частоти обертання двигуна постійного струму

Значення середньої напруги U_{cp} регулюється зміною частоти проходження керуючих імпульсів від генератора імпульсів на тиристор VS . Тверді механічні характеристики й можливість плавного регулювання частоти обертання в широкому діапазоні визначили області застосування двигунів паралельного збудження у верстатних приводах, вентиляторів, а також у багатьох інших випадках регульованого електропривода, де потрібна стійка робота при коливаннях навантаження.

Самостійна робота №47

Тема: Двигуни послідовного збудження.

Мета: ознайомитися зі схемою ввімкнення в мережу двигуна послідовного збудження та з його основними характеристиками; вивчити методи регулювання його частоти обертання.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Принципова схема ввімкнення в мережу двигуна послідовного збудження та його основні характеристики
- 2 Регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Зарисуйте принципову схему ввімкнення в мережу двигуна послідовного збудження.
- 2 Побудуйте механічні та робочі характеристики двигуна послідовного збудження. Проаналізуйте їх.
- 3 Як виконується регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження зміною напруги?
- 4 Як змінюються механічні характеристики двигуна послідовного збудження при зміні напруги?
- 5 Які є способи регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження за допомогою зміни магнітного потоку?

1 Принципова схема ввімкнення в мережу двигуна послідовного збудження та його основні характеристики

У цьому двигуні обмотка збудження включена послідовно в коло якоря (мал. 29.9, а), тому магнітний потік Φ у ньому залежить від токовища навантаження $I = I_a = I_B$. При невеликих навантаженнях магнітна система машини не насичена й залежність магнітного потоку від токовища навантаження прямо пропорційна, тобто $\Phi = k_\phi I_a$. У цьому випадку знайдемо по (25.24) електромагнітний момент:

$$M = c_M k_\phi I_a I_a = c'_M I_a^2$$

Формула частоти обертання (29.5) прийме вид

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e k_\phi I_a} = \frac{U - I_a \sum r}{c'_e I_a}.$$

(29.15)

Тут k_ϕ — коефіцієнт пропорційності.

На мал. 29.9, б представлені робочі характеристики $M = f(I)$ й $n = f(I)$ двигуна послідовного збудження. При більших навантаженнях настає насичення магнітної системи двигуна. У цьому випадку магнітний потік при зростанні навантаження практично не змінюється й характеристики двигуна здобувають майже прямолінійний характер. Характеристика частоти обертання двигуна послідовного збудження показує, що частота обертання двигуна значно міняється при змінах навантаження. Таку характеристику прийнято називати м'якою.

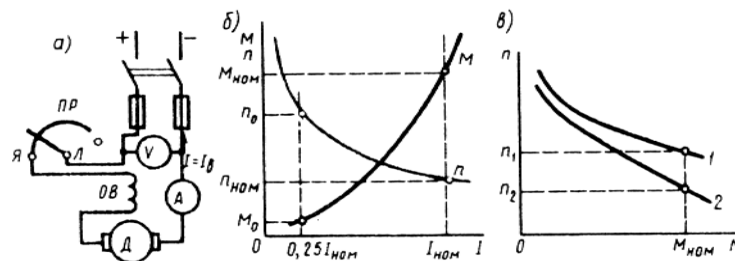


Рис. 29.9. Двигун послідовного збудження:

а — принципова схема; б — робочі характеристики; в — механічні характеристики; 1 — природна характеристика; 2 — штучна характеристика

При зменшенні навантаження двигуна послідовного збудження частота обертання різко збільшується й при навантаженні менше 25% від номінальної може досягти небезпечних для двигуна значень («рознос»). Тому робота двигуна послідовного збудження або його пуск при навантаженні на валу менше 25% від номінальної неприпустима.

Для більше надійної роботи вал двигуна послідовного збудження повинен бути жорстко з'єднаний з робочим механізмом за допомогою муфти й зубчастої передачі. Застосування пасової передачі неприпустимо, тому що при обриві або скиданні ременя може відбутися «рознос» двигуна. З огляду на можливість роботи двигуна на підвищених частотах обертання, двигуни послідовного збудження, відповідно до Держстандарту, випробовують протягом 2 хв на

перевищення частоти обертання на 20% понад максимальної, зазначеної на заводському щиті, але не менше ніж на 50% понад номінальну.

Механічні характеристики двигуна послідовного збудження $n = f(M)$ представлені на мал. 29.9, в. Різко падаючі криві механічних характеристик (природна 1 і штучна 2) забезпечують двигуну послідовного збудження усталену роботу при будь-якому механічному навантаженні. Властивість цих двигунів розвивати великий обертаючий момент, пропорційна квадрату токовища навантаження, має важливе значення, особливо в тяжких умовах пуску й при перевантаженнях, тому що з поступовим збільшенням навантаження двигуна потужність на його вході росте повільніше, ніж обертаючий момент. Ця особливість двигунів послідовного збудження є однією із причин їхнього широкого застосування як тягові двигуни на транспорті, а також як кранові двигуни в піднімальних установках, тобто у всіх випадках електропривода з тяжкими умовами пуску й сполучення значних навантажень на вал двигуна з малою частотою обертання.

Номінальна зміна частоти обертання двигуна послідовного збудження

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_{[0,25]} - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} 100\% ,$$

(29.16)

де $n_{[0,25]}$ — частота обертання при навантаженні двигуна, що становить 25% від номінальної.

2 Регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження

Частоту обертання двигунів послідовного збудження можна регулювати зміною або напруги U , або магнітного потоку обмотки збудження. У першому випадку в ланцюг якоря послідовно включають регульовальний реостат R_{pe} (мал. 29.10, а). Зі збільшенням опору цього реостата зменшуються напруга на вході двигуна й частота його обертання. Цей метод регулювання застосовують головним чином у двигунах невеликої потужності. У випадку значної потужності двигуна цей спосіб неекономічний через більші втрати енергії в R_{pe} . Крім того, реостат R_{pe} , що розраховує на робоче токовище двигуна, виходить громіздким і дорогим.

При спільній роботі декількох однотипних двигунів частоту обертання регулюють зміною схеми їхнього включення відносно один одного (мал. 29.10, б). Так, при паралельному включенні двигунів кожний з них виявляється під повною напругою мережі, а при послідовному включенні двох двигунів на кожен двигун доводиться половина напруги мережі. При одночасній роботі більшого числа двигунів можливо більша кількість варіантів включення. Цей спосіб регулювання частоти обертання застосовують в електровозах, де встановлено кілька однакових тягових двигунів.

Зміна подводимого до двигуна напруги можливо при харчуванні двигуна від джерела постійного токовища з регульованою напругою (наприклад, за схемою, аналогічної мал. 29.6, а). При зменшенні подводимого до двигуна

напруги його механічні характеристики зміщуються вниз, практично не міняючи своєї кривизни (мал. 29.11).

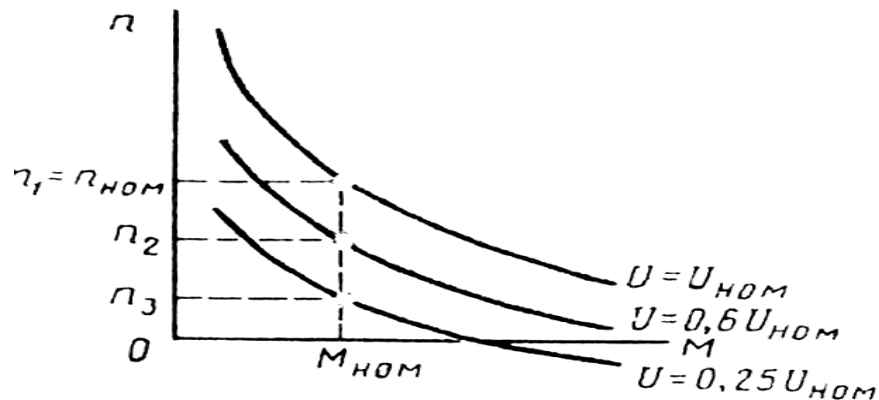


Рис. 29.11. Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при зміні подвдимого напруги

Регулювати частоту обертання двигуна зміною магнітного потоку можна трьома способами: шунтуванням обмотки збудження реостатом r_{pz} , секціонуванням обмотки збудження й шунтуванням обмотки якоря реостатом $r_{ш}$. Включення реостата r_{pz} , шунтуючого обмотку збудження (мал. 29.10, в), а також зменшення опору цього реостата веде до зниження токовища збудження $I_B = I_a - I_{pz}$, а отже, до росту частоти обертання. Цей спосіб економічне попереднього (див. мал. 29.10, а), застосовується частіше й оцінюється коефіцієнтом регулювання $k_{pz} = (I_{pz} / I_a) \cdot 100\%$. Звичайний опір реостата r_{pz} приймається таким, щоб $k_{pz} \geq 50\%$.

При секціонуванні обмотки збудження (мал. 29.10, з) відключення частини витків обмотки супроводжується ростом частоти обертання. При шунтуванні обмотки якоря реостатом $r_{ш}$ (див. мал. 29.10, в) збільшується токовище збудження $I_B = I_a + I_{ш}$, що викликає зменшення частоти обертання. Цей спосіб регулювання, хоча й забезпечує глибоке регулювання, неекономічний і застосовується дуже рідко.

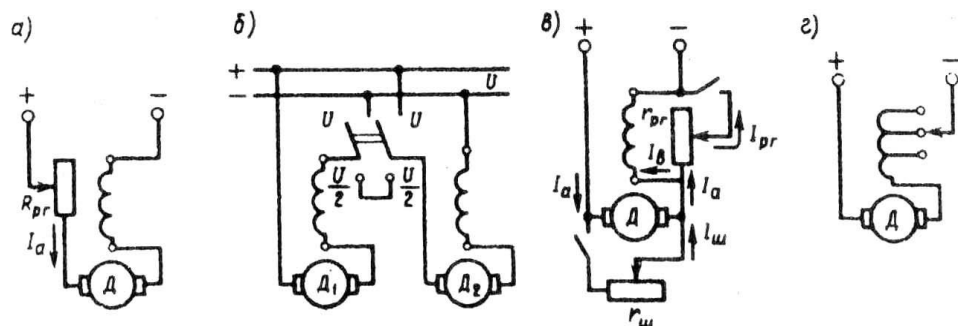


Рис. 29.10. Регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження

Самостійна робота №48

Тема: Втрати і ккд машин постійного струму. Серії машин постійного струму.

Мета: ознайомитися з видами втрат, визначити коефіцієнт корисної дії та вивчити серії машин постійного струму.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Види втрат машин постійного струму
- 2 Коефіцієнт корисної дії машин постійного струму
- 3 Машини постійного струму серій 4П

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Де виникають магнітні втрати в машині постійного струму? Як їх визначити?
- 2 Чим обумовлені електричні втрати в машині постійного струму?
- 3 З яких складових складаються механічні втрати в машині постійного струму?
- 4 Які втрати вважаються постійними? Чому?
- 5 З яких видів втрат складаються додаткові втрати?
- 6 Виведіть формулу ККД для машини постійного струму.
- 7 Якими методами можна визначити ККД?
- 8 Опишіть будову двигунів типу 4ПО та 4ПБ.
- 9 Яка область застосування двигунів типу 4ПФ. Опишіть їх будову.

1 Види втрат машин постійного струму

У машинах постійного токовища, як й в інших електричних машинах, мають місце магнітні, електричні й механічні втрати (складові групи основних втрат) і додаткові втрати.

Магнітні втрати P_M відбуваються тільки в сердечнику якоря, тому що тільки цей елемент магнітопровода машини постійного токовища піддається перемагнічуванню. Величина магнітних втрат, що складаються із втрат від гістерезису й втрат від вихрових токовищ, залежить від частоти перемагнічування $f = pn/60$, значень магнітної індукції в зубцях і спинці якоря, товщини аркушів електротехнічної сталі, її магнітних властивостей й якості ізоляції цих аркушів у пакеті якоря.

Електричні втрати в колекторній машині постійного струму обумовлені нагріванням обмоток і щіткового контакту. Втрати в колі збудження визначаються втратами в обмотці збудження й у реостаті, включеному в ланцюг збудження:

$$P_{\text{э.в}} = U_B I_B.$$

(29.18)

Тут U_B — напруга на затисках ланцюга збудження. Втрати в обмотках ланцюга якоря

$$P_{\text{э.а}} = I_a^2 \Sigma r \quad (29.19)$$

де опір обмоток у ланцюзі якоря Σr , наведене до розрахункової робочої температури $\theta_{\text{раб}}$, визначається по (13.4) з урахуванням даних, наведених в § 13.1 й § 8.4.

Електричні втрати також мають місце й у контакті щіток:

$$P_{\text{э.щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_a, \quad (29-$$

20)

де $\Delta U_{\text{щ}}$ — перехідне спадання напруги, В, на щітках обох полярностей, прийняте відповідно до марки щіток по табл. 27.1.

Електричні втрати в ланцюзі якоря й у щітковому контакті залежать від навантаження машини, тому ці втрати називають *змінними*.

Механічні втрати. У машині постійного токовища механічні втрати складаються із втрат від тертя щіток об колектор

$$P_k = k_{\text{мп}} S_{\text{щ}} f_{\text{щ}} V_k,$$

(29.21)

тертя в підшипниках $P_{\text{п}}$ і на вентиляцію $P_{\text{вен}}$

$$P = P_k + P_{\text{п}} + P_{\text{вен}},$$

(29.22)

де $k_{\text{мп}}$ — коефіцієнт тертя щіток об колектор ($k_{\text{мп}} = 0,2 \div 0,3$); $S_{\text{щ}}$ — поверхня зіткнення всіх щіток з колектором, м²; $f_{\text{щ}}$ — питомий тиск, Н/м², щітки [для машин загального призначення $f_{\text{щ}} = (2 \div 3) \cdot 10^4$ Н/м²];

колова швидкість колектора (м/с) діаметром D_k (м)

$$V_k = \pi D_k n / 60. \quad (29.23)$$

Механічні й магнітні втрати при стабільній частоті обертання ($n = const$) можна вважати *постійними*.

Сума магнітних і механічних втрат становлять втрати х.х.:

$$P_0 = P_m + P_{мех}. \quad (29.24)$$

Якщо машина працює як двигун паралельного збудження в режимі х.х., то вона споживає з мережі потужність

$$P_{10} = UI_{a0} + U_B I_B = P_m + P_{мех} + I_{a0}^2 \sum r + \Delta U_{щ} I_{a0} + U_B I_B. \quad (29.25)$$

Однак через невелике значення токовища I_{a0} електричні втрати $I_{a0}^2 \sum r$ й $\Delta U_{щ} I_{a0}$ досить малі й звичайно не перевищують 3% втрат $P_0 = P_m + P_{мех}$. Тому, не допускаючи помітної помилки, можна записати $P_{10} = UI_{a0} + U_B I_B = P_0 + U_B I_B$, звідки втрати х.х.

$$P_0 = P_{10} - U_B I_B. \quad (29.26)$$

Таким чином, втрати х.х. (магнітні і механічні) можуть бути визначені експериментально.

У машинах постійного токовища є ряд втрат, що враховують рідко, - *додаткових*. Ці втрати складаються із втрат від вихрових токовищ у міді обмоток, втрат у зрівняльних з'єднаннях, у сталі якоря через нерівномірний розподіл індукції при навантаженні, у полюсних наконечниках, обумовлених пульсацією основного потоку через наявність зубців якоря, і ін. Додаткові втрати становлять хоча й невелику, але не піддається точному обліку величину. Тому, відповідно до Держстандарту, у машинах без компенсаційної обмотки значення додаткових втрат P_d приймають рівним 1% від корисної потужності для генераторів або 1% від подводимой потужності для двигунів. У машинах з компенсаційною обмоткою значення додаткових втрат приймають рівним відповідно 0,5%.

Потужність (Вт) *на вході машини* постійного токовища (подводимая потужність):

для генератора (механічна потужність)

$$P_{1ген} = M_1 \omega = 0,105 M_1 n, \quad (29.27)$$

де M_1 — обертаючий момент приводного двигуна, Н·м;

для двигуна (електрична потужність)

$$P_{1ДВ} = UI. \quad (29.28)$$

Потужність (Вт) *на виході машини* (корисна потужність):

для генератора (електрична потужність)

$$P_{2ген} = UI; \quad (29.29)$$

для двигуна (механічна потужність)

$$P_{2ДВ} = 0,105M_2n .$$

(29.30)

Тут M_1 й M_2 — момент на валу електричної машини, Н-м; n — частота обертання, про/хв.

2 Коефіцієнт корисної дії машин постійного струму

Коефіцієнт корисної дії електричної машини являє собою відношення потужностей що віддає (корисної) P_2 до подводимой (споживаного) P_1 ,:

$$\eta = P_2 / P_1 .$$

Визначивши сумарну потужність перерахованих вище втрат

$$\Sigma P = P_M + P_{МЕХ} + P_{Э.В} + P_{Эа} + P_{ЭЩ} + P_D ,$$

(29.31)

можна підрахувати КПД машини по одній з наступних формул: для генератора

$$\eta_{Г} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{UI + \Sigma P} ;$$

(29.32)

для двигуна

$$\eta_{ДВ} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \Sigma P}{UI} = 1 - \frac{\Sigma P}{UI} .$$

(29.33)

Звичайно КПД машин постійного токовища становить 0,75—0,90 для машин потужністю від 1 до 100 квт й 0,90—0,97 для машин потужністю понад 100 квт. Набагато менше КПД машин постійного токовища малої потужності. Наприклад, для машин потужністю від 5 до 50 Вт $\eta = 0,15 \div 0,50$. Зазначені значення КПД відповідають номінальному навантаженню машини. Залежність КПД машини постійного токовища від навантаження виражається графіком $\eta = f(P_2)$, форма якого характерна для електричних машин (мал. 29.13).

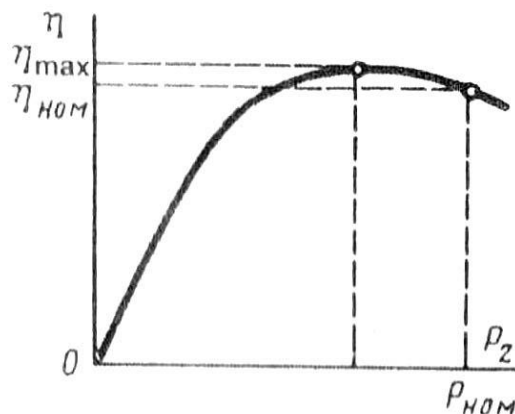


Рис. 29.13. Залежність $\eta = f(P_2)$

Коефіцієнт корисної дії електричної машини можна визначати: а) методом безпосереднього навантаження за результатами вимірів підведеної P_1 й P_2 потужностей, що віддає; б) непрямим методом за результатами вимірів втрат.

Метод безпосереднього навантаження застосуємо тільки для машин малої потужності, для інших випадків застосовується непрямий метод, як більше точний і зручний. Установлено, що при $\eta > 80\%$ вимірювати КПД методом безпосереднього навантаження недоцільно, тому що він дає більшу помилку, чим непрямий метод.

Існує кілька непрямих способів визначення КПД. Найбільш простий спосіб холостого ходу двигуна, коли споживана машиною постійного токовища потужність затрачається тільки на втрати х.х. [див. (29.26)]. Що ж стосується електричних втрат, те їх визначають розрахунковим шляхом після попереднього виміру електричних опорів обмоток і приведення їх до робочої температури.

Приклад. Двигун постійного токовища паралельного збудження (див. мал. 29.3) включений у мережу з напругою 220 У. При номінальному навантаженні й частоті обертання $n_{ном} = 1500$ про/хв він споживає токовище $I_{ном} = 43$ А. Визначити КПД двигуна при номінальному навантаженні, якщо токовище х.х. $I_0 = 4$ А, а опору ланцюгів якоря $\sum r = 0,25$ Ом і збудження $r_B = 150$ Ом. При якому додатковому опорі $r_{ДОБ}$, включеному послідовно в ланцюг якоря, частота обертання двигуна буде $n = 1000$ про/хв (навантажувальний момент $M_2 = const$)?

Рішення. Токовище збудження $I_B = U / r_B = 220 / 150 = 1,47$ А. Токовище якоря в режимі х.х. $I_{a0} = I_0 - I_B = 4 - 1,47 = 2,53$ А. Токовище якоря номінальний $I_{аном} = I_{ном} - I_B = 43 - 1,47 = 41,53$ А. Сума магнітних і механічних втрат $P_0 = P_M + P_{МЕХ} = UI_{a0} - I_{a0}^2 \sum r = 220 \cdot 2,53 - 2,53^2 \cdot 0,25 = 555$ Вт. Електричні втрати в ланцюзі збудження по (29.18)

$$P_{Э.В} = UI_B = 220 \cdot 1,47 = 323,4 \text{ Вт.}$$

Електричні втрати в ланцюзі якоря по (29.19)

$$P_{Э.а} = I_{аном}^2 \sum r = 41,53^2 \cdot 0,25 = 431 \text{ Вт.}$$

Електричні втрати в щітковому контакті по (29.20)

$$P_{Э.щ} = \Delta U_{щ} I_{аном} = 2 \cdot 41,53 = 83 \text{ Вт.}$$

Подводимая до двигуна потужність по (29.28)

$$P_{1ном} = UI_{ном} = 220 \cdot 43 = 9460 \text{ Вт.}$$

Додаткові втрати

$$P_{ДОБ} = 0,01 P_{1ном} = 0,01 \cdot 9460 = 94,6 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати по (29.31)

$$\sum P = 555 + 323,4 + 431 + 83 + 94,6 = 1487 \text{ Вт.}$$

Корисна потужність двигуна

$$P_{ном} = P_{1ном} - \sum P = 9460 - 1487 = 7973 \text{ Вт.}$$

КПД двигуна при номінальному навантаженні

$$\eta_{ном} = P_{ном} / P_{1ном} = 7973 / 9460 = 0,843.$$

З вираження (29.5) одержимо

$$c_e \Phi = \frac{U - I_a \sum r}{n_{ном}} = \frac{220 - 41,53 \cdot 0,25}{1500} = 0,14$$

ЭДС якоря при частоті обертання 1000 про/хв по (25.20)

$$E_a = c_e \Phi n = 0,14 \cdot 1000 = 140 \text{ В.}$$

Тому що токовище якоря прямо пропорційний моменту $I_a \equiv M$ [див (25.24)], те при $M = const$ сила токовища I_a після включення $r_{\text{ДОБ}}$ залишиться колишньої $I_a = I_{\text{ном}} = 41,53 \text{ А}$. З вираження токовища якоря (29.2) одержимо

$$r_{\text{ДОБ}} = \frac{U - E_a}{I_a} - \sum r = \frac{220 - 140}{41,53} - 0,25 = 1,68 \text{ Ом.}$$

Електричні втрати в додатковому опорі

$$P_{\text{о,ДОБ}} = I_a^2 r_{\text{ДОБ}} = 41,53^2 \cdot 1,68 = 2897 \text{ Вт.}$$

Корисна потужність двигуна при частоті обертання 1000 про/хв

$$P_2 \approx P_{\text{ном}} - P_{\text{о,ДОБ}} = 7973 - 2897 = 5076 \text{ Вт.}$$

Розрахунок корисної потужності P_2 є наближеним, тому що він не враховує зменшення механічних втрат двигуна при його переході на меншу частоту обертання.

3 *Машини постійного струму серії 4П*

Стрімкий розвиток автоматизації виробництва привело до необхідності створення двигунів постійного токовища із широким діапазоном регулювання частоти обертання (до 1:1000) з гарними динамічними властивостями. Цим вимогам відповідають двигуни серії 4П. Серія охоплює двигуни з висотою осі обертання від 80 до 450 мм наступних модифікацій.

Двигуни типу 4ПО й 4ПБ охоплюють діапазон потужності від 0,126 до 5,5 квт при номінальній частоті обертання від 750 до 3000 про/хв. Двигуни допускають регулювання частоти обертання вниз від номінальної зменшенням напруги на обмотці якоря при зниженні токовища до $0,5 I_{\text{ном}}$. А так само нагору від номінальної (зменшенням токовища збудження) у межах максимальної частоти обертання, що перевищує номінальну в середньому в 1,35- 1,8 рази.

Конструкція цих двигунів уніфікована з асинхронними двигунами серії 4А. Це дозволило застосувати для виробництва деяких вузлів двигунів типу 4ПО й 4ПБ технологічне встаткування, застосовуване у виробництві двигунів серії 4А. В уніфікованій конструкції цих двигунів магнітопровод статора неявнополюсний з розподіленими в пазах обмотками. Так, обмотка збудження (незалежна) укладається у два пази в межах кожного полюсного розподілу, інші пази займає компенсаційна обмотка. У двигунах типу 4ПО й 4ПБ і двигунах серії 4А однакові габарити можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові шиті, коробки висновків, підшипники й т.п.

Застосування розподілених обмоток на статорі двигунів типу 4ПО й 4ПБ поліпшило процес охолодження й дозволило збільшити струмові навантаження на обмотки збудження й компенсаційну. Крім того, розподілена конструкція обмоток статора сприяє кращій компенсації реакції якоря й поліпшенню комутації.

Двигуни постійного токовища типів 4ПО й 4ПБ мають закрите виконання зі ступенем захисту IP44 зі способами охолодження IC0141 (зовнішній обдувши) у двигунах типу 4ПО (мал. 29.14) і IC0041 (природне охолодження) у двигунах типу 4ПБ.

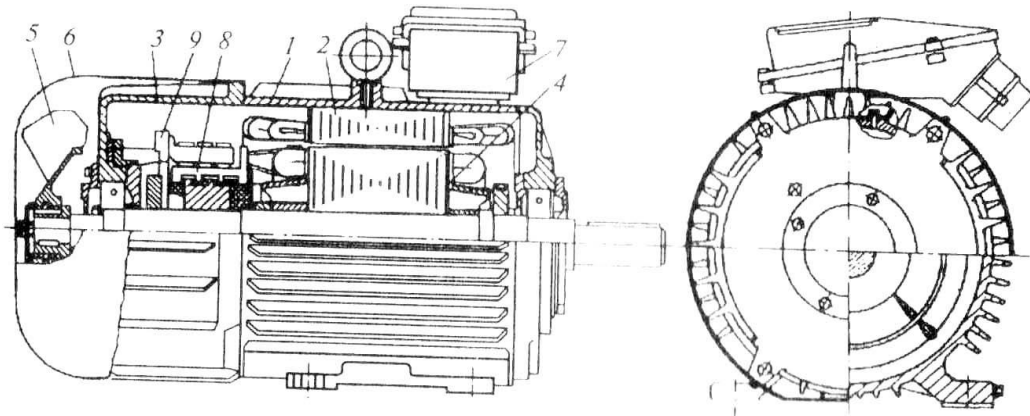


Рис. 29.14. Двигун постійного токовища типу 4ПО уніфіковані конструкції;

1 — корпус; 2 — магнітопровід статори з розподіленими обмотками; 3 — шитий підшипниковий передній; 4 — сердечник якоря; 5 — вентилятор, 6 — кожух вентилятора; 7 — коробка висновків; 8 — колектор, 9 — траверсу.

Широкорегулируемые двигуни типу 4ПФ призначені для приводу верстатів із програмним керуванням, роботизованих виробничих комплексів. Виконання двигунів по ступені захисту IP23 (захищені), спосіб охолодження IC06 (незалежна вентиляція). Двигуни охоплюють номінальні потужності від 2,0 до 250 кВт при висоті осі обертання від 112 до 250 мм. Напруга харчування 220 й 440 В. Регулювання частоти обертання можливо зміною подводимого до обмотки якоря напруги від 0 до 460 В. Допускається також регулювання частоти обертання ослабленням поля збудження (зменшенням токовища в обмотці збудження).

Статор двигунів восьмигранний шихтований, явнополюсный (мал. 29.15). Пакет статора запресований між двома натискними плитами товщиною 10 мм. Підшипникові шиті литі чавунні.

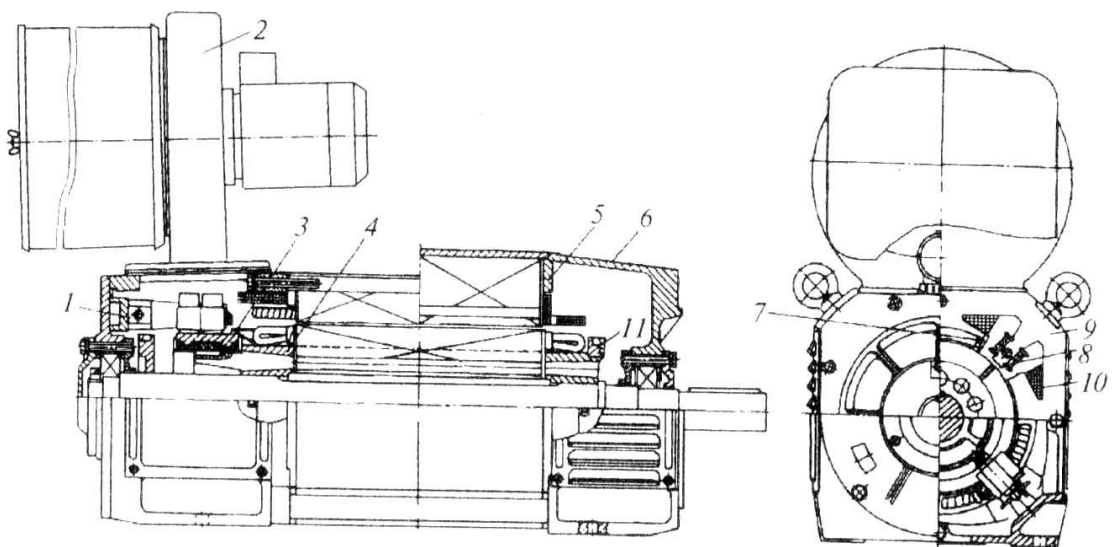


Рис. 29.15. Двигун постійного токовища типу 4ПФ:

1 — траверсу; 2 — вентилятор зовнішній; 3 — колектор; 4 — обмоткодержатель якоря; 5 — натискна плита статора; 6 — підшипниковий щит; 7 — обмотка компенсаційна; 8 — додатковий полюс; 9 — статор; 10 — обмотка незалежного збудження; 11 — балансувальне кільце

Котушки збудження намотані на головні полюси, котушки додаткової обмотки надеті на додаткові полюси, компенсаційна обмотка розташована в пазах полюсних наконечників.

Зовнішній вентилятор може бути постачений фільтром для очищення повітря від пилу й дрібних часток. Вентилятор розташований на бічній або торцевій поверхні з боку колектора.

Великі двигуни 4П для тяжких умов експлуатації призначені для приводу великих металорізальних верстатів, механізмів металургійного виробництва, із частими пусками, зупинками, реверсами, набросами й нерівномірністю навантаження. Двигуни виготовляються з висотою осі обертання 355 й 450 мм потужністю від 110 до 800 квт; напруга харчування 440 й 600 У. Збудження незалежне напругою 220 У. Вентиляція від стороннього вентилятора. Двигуни мають ступінь захисту IP44 й IP23.

Самостійна робота №49

Тема: Універсальні колекторні двигуни. Електромашинні підсилювачі.

Мета: вивчити принцип дії універсальних колекторних двигунів та електромагнітних підсилювачів.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Принцип дії універсальних колекторних двигунів
- 2 Робочі характеристики універсальних колекторних двигунів
- 3 Електромашинний підсилювач

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Поясніть принцип дії універсального колекторного двигуна.
- 2 Чим конструктивно відрізняється універсальний колекторний двигун від однофазного двигуна постійного струму?
- 3 Зарисуйте схему з'єднання універсального колекторного двигуна.
- 4 Для чого призначений електромашинний підсилювач?
- 5 Поясніть принцип дії електромашинного підсилювача.
- 6 Чим характеризується підсилення потужності?
- 7 Для чого призначена компенсаційна обмотка в електромашинному підсилювачі?
- 8 Опишіть будову електромашинного підсилювача.
- 9 Побудуйте зовнішні характеристики електромашинного підсилювача. Побудову поясніть.

1 Принцип дії універсальних колекторних двигунів

Універсальними називають колекторні двигуни, які можуть працювати як від мережі постійного, так і від мережі однофазного змінного токовища.

Колекторний двигун постійного струму в принципі може працювати від мережі змінного струму, тому що при переході від позитивного напівперіоду змінної напруги до негативного напрямок електромагнітного моменту зберігається незмінним. Пояснюється це тим, що при переході до негативного напівперіоду майже одночасно зі зміною напрямку струму в обмотці якоря міняється напрямок струму в обмотці збудження, тобто міняється полярність полюсів.

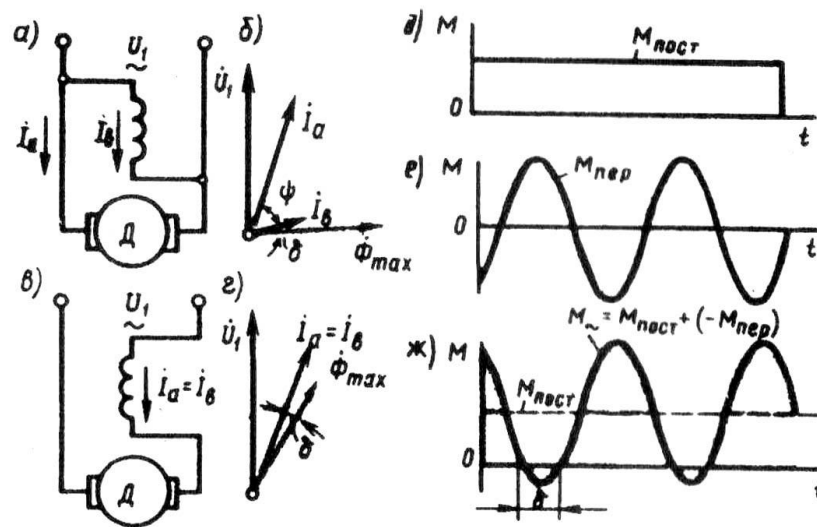


Рис. 29.14. До принципу роботи універсального колекторного двигуна

Однофазні колекторні двигуни мають переважно послідовне збудження. Застосування паралельного збудження (мал. 29.14, а) у цьому випадку обмежується значною індуктивністю паралельної обмотки збудження, що має велику кількість витків. Це створює значне фазове зрушення між токовищем якоря I_a й токовищем збудження I_B на кут ψ (мал. 29.14, б). Середнє значення електромагнітного моменту в цьому випадку визначається вираженням, аналогічним вираженню (25.24), але враховуючий кут зрушення між токовищем якоря й магнітним потоком:

$$M_{нар} = c_M (\Phi_{max} / \sqrt{2}) I_a \cos(\psi + \delta), \quad (29.34)$$

де Φ_{max} — максимальне значення магнітного потоку; ψ — кут зрушення фаз між токовищем якоря й токовищем збудження; δ — кут зрушення фаз між токовищем збудження й магнітним потоком, обумовлений наявністю магнітних втрат у машині [$(\psi + \delta) \approx 90^\circ$, а отже, $\cos(\psi + \delta) \approx 0$].

У двигуні послідовного збудження (мал. 29.14, в) струм якоря i_a й струм збудження I_B збігаються по фазі: $\psi = 0$ (мал. 29.14, г). Тому середнє значення електромагнітного обертаючого моменту у двигуні послідовного збудження $M_{пост}$ більше, ніж у двигуні паралельного збудження:

$$M_{\text{носл}} = c_M (\Phi_{\text{max}} / \sqrt{2}) I_a \cos \delta. \quad (29.35)$$

Електромагнітний момент двигуна послідовного збудження при роботі від мережі змінного токовища має постійну складову $M_{\text{носм}}$ (мал. 29.14, д) і змінну складову $M_{\text{неп}}$, що змінюється із частотою, рівній подвоєній частоті мережі f_1 (мал. 29.14, е). Результуючий момент цього двигуна є пульсуючою $M_{\text{~}} = M_{\text{носл}}$ (мал. 29.14, ж): $M_{\text{~}} = M_{\text{носм}} + (-M_{\text{неп}})$. Невеликі ділянки графіка $M = f(t)$ з негативним (гальмуючим) моментом обумовлені фазовим зрушенням між векторами магнітного потоку $\dot{\Phi}_{\text{max}}$ й токовищем I_1 (мал. 29.14, з). Пульсації моменту $M_{\text{~}}$ практично не порушують роботу двигуна, включеного в мережу змінного токовища, тому що згладжуються за рахунок моменту інерції обертового якоря.

По своїй конструкції універсальні колекторні двигуни відрізняються від двигунів постійного струму тим, що їхня станина й головні полюси робляться шихтованими з листової електротехнічної сталі. Це дає можливість скоротити магнітні втрати, які при роботі двигуна від мережі змінного токовища підвищуються, тому що змінне токовище в обмотці збудження викликає перемагнічування всього магнітного ланцюга, включаючи станину й сердечники полюсів.

Основний недолік однофазних колекторних двигунів — тяжкі умови комутації. Справа в тому, що в комутуючих секціях крім реактивної ЕРС й ЕРС зовнішнього поля (див. § 27.3) наводиться трансформаторна ЕРС e_{mp} , що діє значення якої

$$E_{\text{mp}} = 4,4 f_1 w_c \Phi_{\text{max}}. \quad (29.36)$$

Ця ЕРС наводиться змінним магнітним потоком збудження, зчепленим з комутуючими секціями. Для зменшення трансформаторної ЕРС необхідно зменшити потік Φ_{max} , а щоб потужність двигуна при цьому залишилася колишньої, варто збільшити число полюсів у двигуні.

Застосування в обмотці якоря двигуна одновиткових секцій ($w_c = 1$) також сприяє обмеженню E_{mp} , але при цьому збільшується кількість пластин у колекторі, а отже, зростають його розміри. Застосування додаткових полюсів з обмоткою, включеної послідовно в ланцюг якоря, дозволяє домогтися повної взаємної компенсації трансформаторної ЕРС тільки при певних значеннях токовища якоря й частоти обертання. При інших режимах роботи двигуна умови комутації залишаються важкими. Регулювання частоти обертання й реверсування однофазного колекторного двигуна виконуються так само, як й у двигунах постійного токовища послідовного збудження.

2 Робочі характеристики універсальних колекторних двигунів

В універсальному колекторному двигуні прагнуть одержати приблизно однакові частоти обертання при номінальному навантаженні, як на постійному, так і на змінному токовищі. Досягається це тим, що обмотку збудження двигуна виконують із відгалуженнями: при роботі двигуна від

мережі постійного токовища обмотка збудження використовується повністю, а при роботі від мережі змінного токовища — частково (мал. 29.15, а).

Розбіжності в характеристиках двигуна на постійному й змінному токовищі порозуміваються тим, що при роботі від мережі змінного токовища на величину й фазу токовища впливають індуктивні опори обмоток якоря й збудження.

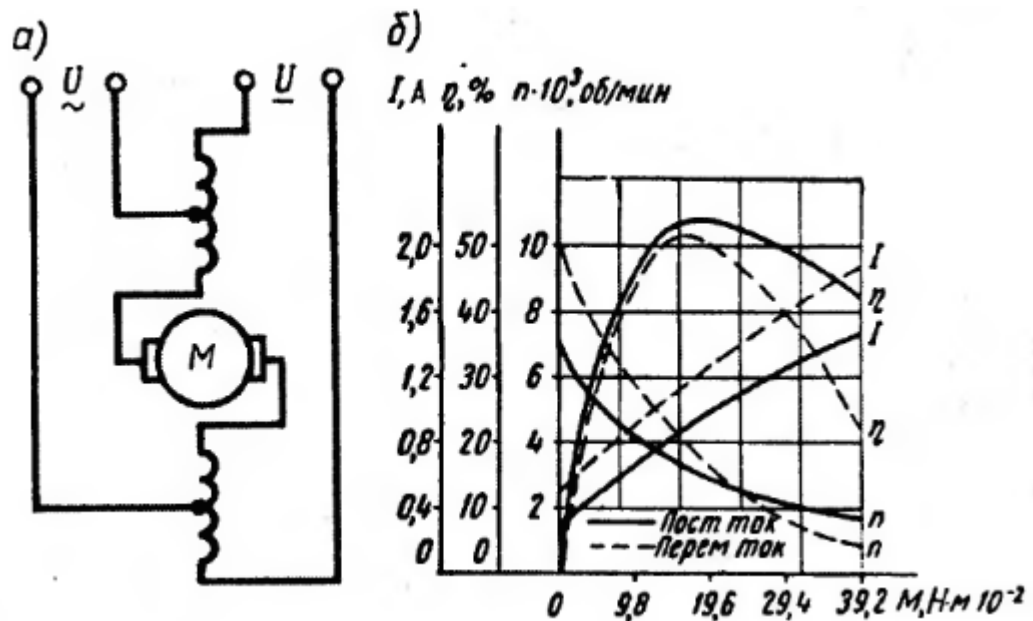


Рис. 29.15. Схема з'єднань і робочі характеристики універсального колекторного двигуна

Однак зменшення числа витків обмотки збудження забезпечує зближення характеристик лише при навантаженні, близької до номінального. На мал. 29.15, б наведені робочі характеристики універсального колекторного двигуна типу УМТ-22 (55 Вт, 200 про/хв, 110/127 В). Споживаний двигуном струм при роботі від мережі змінного токовища більше, ніж при роботі цього ж електродвигуна від мережі постійного токовища, тому що змінне токовище крім активної має ще й реактивну складову. Коефіцієнт корисної дії універсальних двигунів при змінному струмі нижче, ніж при постійному, що викликано підвищеними магнітними втратами. Області застосування універсальних колекторних двигунів досить широкі: їх застосовують в автоматичі, для приводу різного електроінструмента, побутових електроприладів й ін.

3 Електромашинний підсилювач

Електромашинний підсилювач (ЕМУ) являє собою електричну машину, що працює в генераторному режимі й призначена для посилення електричних сигналів. Електромашинні підсилювачі застосовуються в системах автоматики. Найпростіший ЕМУ — це генератор постійного струму незалежного порушення (див. мал. 28.2, а). Тому що напруга на виході генератора залежить від струму порушення (див. мал. 28.2, б), те,

змінюючи струм порушення, можна управляти напругою на виході генератора. Отже, порівняно невеликою потужністю в ланцюзі обмотки збудження можна управляти значною потужністю в ланцюзі якоря.

Електромашинні підсилювачі, виконані за принципом генератора незалежного порушення, не знайшли широкого застосування, тому що вони не можуть забезпечити досить великого коефіцієнта підсилення по потужності (не більше 80-100), що представляє собою відношення потужності на виході підсилювача до потужності на вході обмотки керування.

Найбільше поширення в автоматичі одержали *електромашинні підсилювачі поперечного поля*. На відміну від звичайного генератора постійного струму в цьому ЕМУ основним робітником потоком є магнітний потік, створюваний струмом обмотки якоря, — поперечний потік реакції якоря (див. мал. 26.4, б).

На колекторі ЕМУ встановлено два комплекти щіток: один комплект — q_1q_2 (мал. 30.1, а) — розташований по поперечній осі головних полюсів, тобто на геометричній нейтралі, а іншої — d_1d_2 по поздовжній осі головних полюсів. Щітки q_1q_2 замкнуті накоротко, а до щіток d_1d_2 підключений робочий ланцюг ЕМУ.

Помимо обмотки якоря підсилювач має одну або кілька обмоток керування ($y_1; y_2$), компенсаційну обмотку (ОК), поперечну подмагничивающую обмотку (ОП) і обмотку додаткових полюсів (ОД). Як ір підсилювача приводиться в обертання електродвигуном.

Якщо до однієї з обмоток керування підвести напруга U_y , то в цій обмотці з'явиться струм керування I_y , що створює МРС обмотки керування $F_y = I_y w_y$. Ця МРС, у свою чергу, створює магнітний потік Φ_y , що наведе в обмотці якоря в ланцюзі щіток q_1q_2 ЕРС E_q . Електрорушійна сила E_q невелика, але тому що щітки q_1q_2 замкнуті накоротко, те ЕРС E_q викличе значний струм I_q . Струм в обмотці якоря I_q створить МРС F_q і магнітний потік Φ_q , що спрямований по поперечній осі головних полюсів, тобто по геометричній нейтралі, і нерухомий у просторі. В обмотці якоря, що обертається в нерухомому потоці Φ_q , наводиться ЕРС E_d , що знімає з поздовжніх щіток d_1d_2 .

Если до вихідних затискачів ЕМУ підключити навантаження r_n , то ЕРС E_d створить у ланцюзі щіток d_1d_2 робочий струм I_d .

Таким чином, невелика потужність обмотки керування проходить два щаблі посилення: спочатку ця потужність підсилюється на щаблі «ланцюг керування - поперечний ланцюг», а потім на щаблі «поперечний ланцюг - поздовжня (робоча) ланцюг».

Посилення потужності на кожному щаблі характеризується *коефіцієнтом підсилення*, що на щаблі «ланцюг керування — поперечне коло визначається

відношенням потужності в поперечному ланцюзі $P_q = E_q I_{\dot{u}}$ до потужності керування $P_y = U_y I_y$:

$$k_{y1} = P_q / P_y. \quad (30.1)$$

Коефіцієнт підсилення на щаблі «поперечний ланцюг - поздовжня (робоча) ланцюг» визначається відношенням потужностей у цих ланцюгах:

$$k_{y2} = P_d / P_q, \quad (30.2)$$

де $P_d = U_d I_d$ — потужність у робочому колі підсилувача, тобто в ланцюзі щіток $d_1 d_2$.

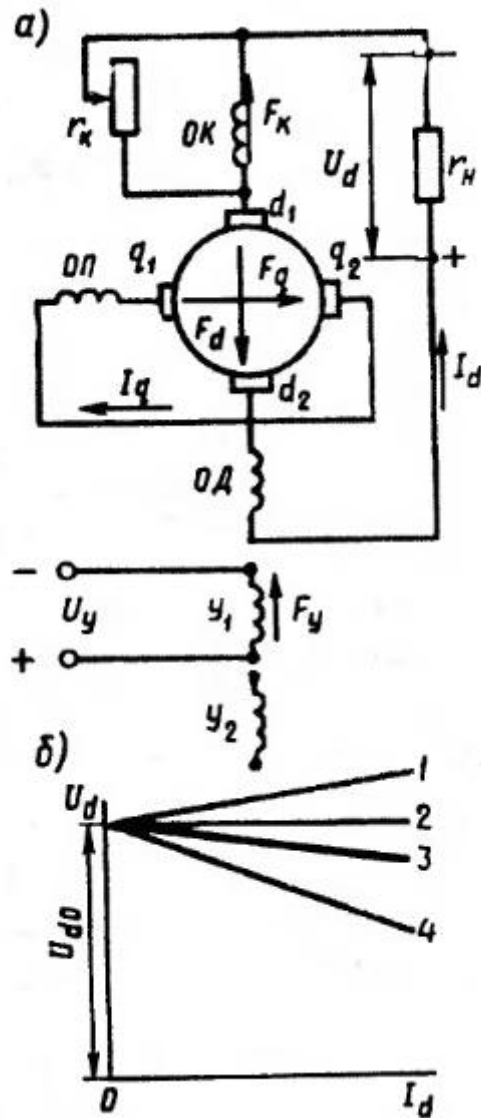


Рис. 30.1 ЕМУ поперечного поля:
 а — принципова схема;
 б — зовнішні характеристики

Загальний коефіцієнт підсилення ЕМУ дорівнює добутку приватних коефіцієнтів підсилення:

$$k_y = k_{y1}k_{y2} = (P_q / P_y)(P_d / P_q) = P_d / P_y. \quad (30.3)$$

Коефіцієнт підсилення електромашинних підсилювачів може досягати 2000-20 000.

Варто пам'ятати, що потужність на виході ЕМУ P_d являє собою перетворену механічну потужність приводного електродвигуна. Значення цієї потужності, що може досягати більше 20 квт, управляється невеликою потужністю керування (звичайно 0,1-1,0 Вт).

Обмотка додаткових полюсів (ОД) служить для поліпшення комутації на поздовжніх щітках d_1d_2 . Поперечна подмагничиваюча обмотка (ОП) підсилює магнітний потік по поперечній осі, що дозволяє зменшити струм у ланцюзі щіток q_1q_2 , отже, поліпшити комутацію на цих щітках (в ЕМУ малої потужності ця обмотка відсутня).

Компенсаційна обмотка (ОК), наявність якої в ЕМУ обов'язково, усуває вплив, що розмагнічує, реакції якоря по поздовжній осі. Справа в тому, що струм робочого ланцюга ЕМУ (струм навантаження) I_d створює МРС по поздовжній осі F_d , спрямовану назустріч МРС обмотки керування F_y . Ця МРС набагато менше МРС F_d , тому навіть при невеликому навантаженні підсилювача вплив, що розмагнічує, реакції якоря по поздовжній осі настільки велико, що підсилювач розмагнічується й напругу на його виводах падає до нуля. Для усунення цього явища на статорі ЕМУ розташовують *компенсаційну* обмотку, включену послідовно в робочий ланцюг якоря. З появою струму I_d в робочому ланцюзі виникає МРС компенсаційної обмотки F_k , спрямована по поздовжній осі зустрічно МРС реакції якоря F_d . Цим усувається (компенсується) вплив, що розмагнічує, реакції якоря по поздовжній осі. Для повної компенсації необхідно, щоб МРС F_d і F_k були рівні, тому що недокомпенсація ($F_k < F_d$) або перекомпенсація ($F_k > F_d$) значно впливає на магнітний потік Φ_y , а отже, і на властивості ЕМУ. Однак розрахувати компенсаційну обмотку з необхідною точністю практично неможливо, що веде до необхідності досвідченого настроювання необхідного значення МРС F_k за допомогою реостата r_k , шунтируючого компенсаційну обмотку.

Електромашинні підсилювачі поперечного поля виконують двухполюсними, при цьому кожний з головних полюсів розщеплюють на дві частини 1, між якими розташовують додаткові полюси 2 (мал. 30.2). Обмотки керування 4 виконують зосередженими у вигляді полюсних котушок, надягнутих на головні полюси, що ж стосується компенсаційної обмотки 3, те її роблять розподіленою, використовуючи для цього пази в полюсних наконечниках головних полюсів. Цим досягається компенсація поздовжньої реакції якоря по всьому периметрі статора.

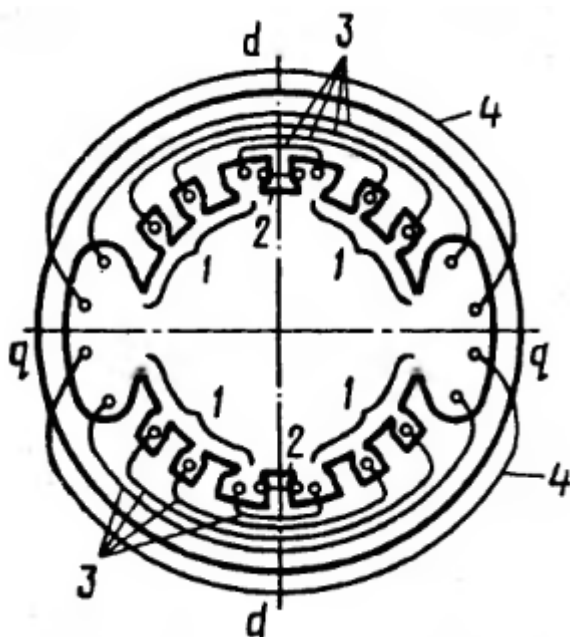


Рис. 30.2. Розташування обмоток ЕМУ на статорі

При потужності до декількох кіловатів ЕМУ виконують у загальному корпусі із приводним двигуном постійний або змінний токи. При значній потужності ЕМУ й двигун виконують роздільно й монтують на загальній рамі.

Робочі властивості ЕМУ в значній мірі визначаються його зовнішньою характеристикою $U_d = f(I_d)$ при $n = const$ й $I_y = const$. Напряга на виході підсилювача

$$U_d = E_d - I_d \sum r_d, \quad (30-4)$$

де $\sum r_d$ сума електричних опорів у поздовжньому ланцюзі якоря, Ом, що включає в себе опору обмотки якоря r_a , додаткових полюсів r_d , компенсаційної обмотки r_k й щіткового контакту $r_{щ}$.

Через те, що магнітний ланцюг підсилювача не насичений, напряга U_d є лінійною функцією струму навантаження I_d , тобто зовнішня характеристика ЕМУ являє собою практично пряму лінію (мал. 30.1, б).

Угол нахилу зовнішньої характеристики до осі абсцис (твердість характеристики) залежить від ступеня компенсації реакції якоря. При повній компенсації МРС компенсаційної обмотки F_k дорівнює МРС реакції якоря по поздовжній осі F_d . У цьому випадку зовнішня характеристика виходить досить твердої (крива 3), тому що зменшення напряги U_d при збільшенні струму навантаження I_d відбувається лише за рахунок збільшення спадання напряги в ланцюзі якоря по поздовжній осі $I_d \sum r_d$.

При недокомпенсації $F_k < F_d$ зовнішня характеристика виходить менш твердої (крива 4). Порозумівається це тим, що при недокомпенсації МРС F_d ,

зростаючи зі збільшенням струму I_d , значно послабляє магнітний потік обмотки керування Φ_y , що веде до помітного зменшення напруги на виході ЕМУ.

Якщо в підсилювачі настроїти *невелику перекомпенсацію* ($F_k > F_d$) так, щоб МРС F_k повністю компенсувала не тільки реакцію якоря F_d по поздовжній осі, але й спадання напруги $I_d \sum r_d$, то зовнішня характеристика підсилювача стає абсолютно твердою й розташовується паралельно осі абсцис (крива 2). У цьому випадку напруга на виході ЕМУ залишається незмінним у всьому діапазоні зміни навантаження.

При *значній перекомпенсації* зовнішня характеристика (крива 1) здобуває висхідний характер, тому що МРС F_k не тільки компенсує F_d , але й створює додатковий поздовжній потік, що, накладаючись на магнітний потік керування Φ_y , викликає збільшення ЕРС E_d . Робота підсилювача з перекомпенсацією стає нестійкою, тому що виникає небезпека довільного самозбудження ЕМУ, при якому збільшення напруги на виході підсилювача викликає ріст струму навантаження, що веде до подальшого збільшення напруги, тобто відбувається необмежене збільшення струму навантаження. Звичайно в підсилювачі набудовують невелику недокомпенсацію, при якій збільшення напруги U_d при зменшенні струму I_d від номінального до нуля становило б 12—20%.

Самостійна робота №50

Тема: Тахогенератор та безконтактні двигуни постійного струму.

Мета: вивчити принцип дії та ознайомитися з призначенням тахогенератора і безконтактних двигунів постійного струму.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Призначення та принцип дії тахогенератора постійного струму
- 2 Призначення та принцип дії безконтактного двигуна постійного струму

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Для чого призначений тахогенератор постійного струму?
- 2 Чим визначається точність роботи тахогенератора постійного струму?
- 3 Поясніть, що таке зона нечутливості тахогенератора постійного струму?
- 4 Яке призначення БДПС?
- 5 Поясніть принцип дії БДПС.
- 6 Опишіть будову БДПС.
- 7 Які переваги та недоліки має БДПС?

1 Призначення та принцип дії тахогенератора постійного струму

Тахогенератори постійного струму служать для виміру частоти обертання за значенням вихідної напруги, а також для одержання електричних сигналів, пропорційних частоті обертання вала в схемах автоматичного регулювання. Тахогенератор постійного струму являє собою генератор малої потужності з електромагнітним незалежним порушенням (мал. 30.3, а) або з порушенням постійними магнітами.

Через те що при постійному струмі збудження $I_B = const$ магнітний потік Φ практично не залежить від навантаження, вихідна ЕРС тахогенератора $E_{вих}$ прямо пропорційна частоті обертання:

$$E_{вих} = c_e \Phi n = c'_e n, \quad (30.5)$$

де $c'_e = c_e \Phi = const$.

Формула (30.5) справедлива й для тахогенератора з порушенням постійними магнітами, де $\Phi = const$. Для виміру частоти обертання тахогенератором вал останнього механічно з'єднують із валом механізму, частоту обертання якого потрібно виміряти. На виводи тахогенератора підключають вимірювальний прилад зі шкалою, градуйованої в одиницях частоти обертання.

Точність роботи тахогенератора визначається його *вихідною характеристикою*, що представляє собою залежність вихідної напруги від частоти обертання n при незмінному значенні опору навантаження. Найбільш точна робота тахогенератора відповідає прямолінійній вихідній характеристиці (мал. 30.3, б, пряма 1).

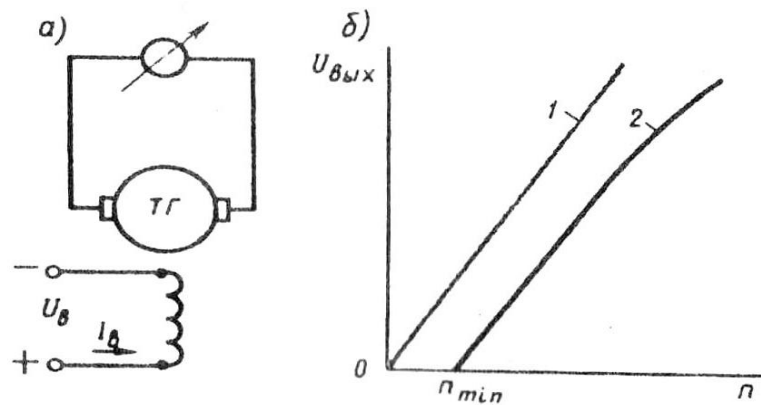


Рис. 30.3. Принципова схема (а), вихідна характеристика (б) тахогенератора постійного струму

Однак у реальних тахогенераторах вихідна характеристика не прямолінійна (графік 2) і до того ж вона виходить не з початку осей координат. Основна причина криволінійності характеристики - реакція якоря, тому зменшенню криволінійності цієї характеристики сприяє включення на вихід тахогенератора приладів з більшим внутрішнім опором, тому що при зменшенні струму якоря послабляється дія реакції якоря. У

сучасних тахогенераторах відхилення вихідної характеристики від прямолінійної становить від 0,5 до 3%.

Спадання напруги в щітковому контакті $\Delta U_{щ}$ створює в тахогенераторі зону *нечутливості*. Це діапазон частот обертання від 0 до n_{\min} , у якому напруга на виході генератора дорівнює нулю. Границя зони нечутливості визначається вираженням

$$n_{\min} = \Delta U_{щ} / (c_e \Phi).$$

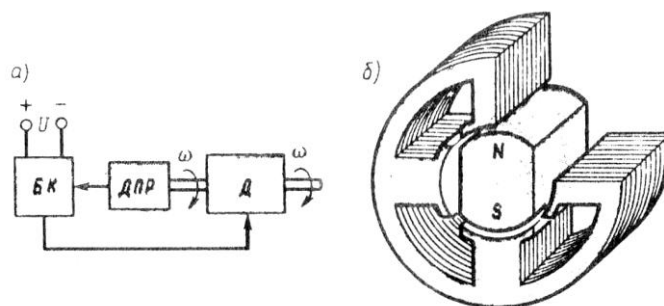
(30.6)

Широке застосування одержали тахогенератори постійного струму, порушувані постійними магнітами. Ці тахогенератори не мають обмотки збудження, і тому вони простіше по конструкції й мають менші габарити.

2 Призначення та принцип дії безконтактного двигуна постійного струму

З метою поліпшення властивостей двигунів постійного струму були створені двигуни з безконтактним комутатором, називані безконтактними двигунами постійного струму (БДПТ). Відмінність БДПТ від колекторних двигунів традиційної конструкції полягає в тому, що в них щітково-колекторний вузол замінений напівпровідниковим комутатором (інвертором), керованим сигналами, що надходять із безконтактного датчика положення ротора. Робоча обмотка двигуна - обмотка якоря - розташована на сердечнику статора, а постійний магніт - на роторі.

Вал двигуна D (мал. 30.4, *a*) механічно з'єднаний з датчиком положення ротора (ДПР), сигнал від якого надходить у блок комутатора (БК). Підключення секцій обмотки якоря до джерела постійного струму відбувається через елементи блоку комутатора (БК). Призначення ДПР - видавати керуючий сигнал у блок комутатора відповідно до положення полюсів постійного магніту щодо секцій обмотки якоря.



мал. 30.4. Безконтактний двигун постійного струму:
a — блок-схема, *b* — магнітна система

Як датчики положення ротора застосовують чутливі різні безконтактні елементи з мінімальними розмірами й споживаною потужністю й великою кратністю мінімального й максимального сигналів, щоб не викликати

порушень у роботі блоку комутатора. Чутливі елементи ДПР повинні надійно працювати при зовнішніх впливах (температура, вологість, вібрації й т.п.), на які розрахований двигун. Такі властивості властиві ряду чутливих елементів (датчиків): індуктивних, трансформаторних, магніодиодов і т.п. Найбільше доцільно використати *датчики ЕРС Холла* (мал. 30.5), що представляють собою тонку напівпровідникову пластину з нанесеними на ній контактні-

мі площадками, до яких припаяні виводи 1—2, підключені до джерела напруги U_1 , і виводи 3—4, з яких знімають вихідний сигнал U_2 . Якщо в ланцюзі 1—2 проходить струм I , а датчик перебуває в магнітному полі, вектор індукції B який перпендикулярний площини пластини датчика, то в датчику наводиться ЕРС і на виводах 3—4 з'являється напруга U_2 . Значення ЕРС залежить від струму I й магнітної індукції B , а полярність — від напрямку струму I в ланцюзі 1—2 і напрямку вектора магнітної індукції B .

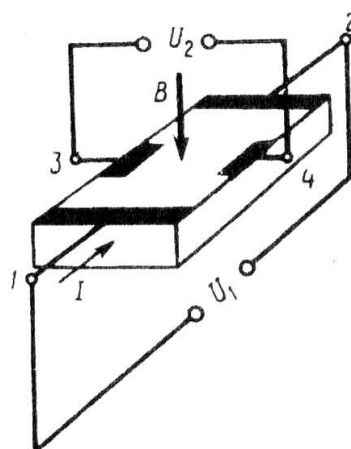


Рис. 30.5. Датчик ЭДС Холла

Розглянемо роботу безконтактного двигуна постійного струму, для керування яким застосовують датчики Холла й комутатор, виконаний на транзисторах $VT1-VT4$ (мал. 30.6). Чотири обмотки (фази) двигуна w_1-w_4 розташовані на явно виражених полюсах шихтованого сердечника якоря (див. мал. 30.4, б). Датчики Холла $ДХ1$ і $ДХ2$ установлені в пазах полюсних наконечників двох суміжних полюсів. Силкові транзистори $VT1-VT4$ працюють у релейному (ключовому) режимі (мал. 30.6). Сигнал на відкриття транзистора надходить від відповідного датчика Холла (датчика положення ротора). Живлення датчиків Холла (виводи 1—2) здійснюється від джерела напругою U_1 .

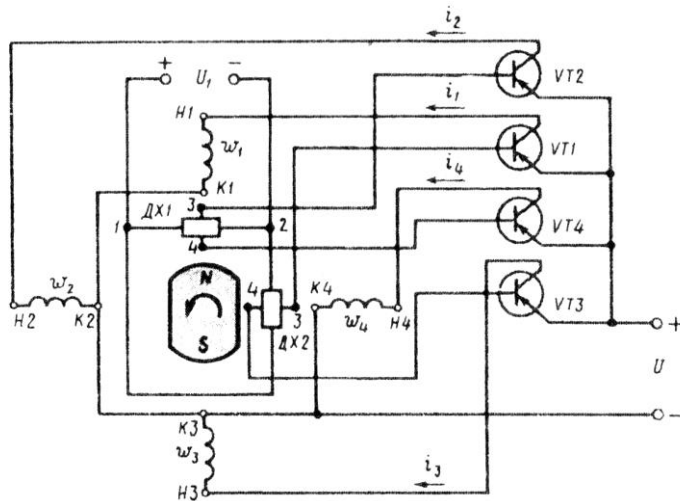


Рис. 30.6. Принципова схема БДПТ

Кожна обмотка (фаза) виконана із двох котушок, розташованих на протилежних полюсах сердечника статора й з'єднаних послідовно (мал. 30.7). Якщо по який-небудь із обмоток (фаз) статора проходить струм від початку $H1-H4$ до кінця $ДO1-ДO4$, то полюси сердечника статора здобувають полярність відповідно S й N .

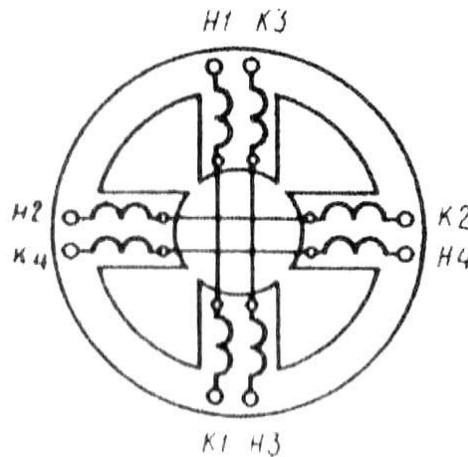


Рис. 30.7. Розташування обмоток фаз на полюсах статора БДПТ

При положенні ротора, показаному на мал. 30.6, у зоні магнітного полюса N перебуває датчик $ДX1$. При цьому на виході датчика з'являється сигнал, при якому транзистор $VT2$ переходить у відкритий стан. В обмотці (фаза) статора w_2 з'являється струм i_2 , що протікає від $H2$ до $ДO2$. При цьому полюси статора 2 й 4 здобувають полярність S й N (мал. 30.8, a). У результаті взаємодії магнітних полів статора й ротора (постійного магніту) з'являється електромагнітний момент M , що обертає ротор. Після повороту ротора щодо осі полюсів статора 1—3 на деякий кут а проти вартовий стрілки датчик $ДX2$ виявиться в зоні магнітного полюса ротора S , при цьому по сигналі з датчика $ДX2$ включається транзистор $VT3$. У фазній котушці w_3 виникає струм i_3 і полюси 3 й / здобувають полярність S й N . При цьому

магнітний потік статора Φ створюється спільною дією МРС обмоток фаз w_2 й w_3 . Вектор цього потоку повернуть щодо осі 2—4 на кут 45° (мал. 30.8, б). Ротор, продовжуючи обертання, займає положення по осі полюсів статора 2—4. При цьому датчик ДХ1 попадає в межполюсное простір ротора, а датчик ДХ2 залишиться в зоні полюса S ротора. У результаті транзистор VT2 закривається, транзистор VT3 залишиться відкритим і магнітним потоком Φ , створюваний МРС обмотки фази w_3 , повертається щодо осі полюсів 2—4 ще на 45° (мал. 30.8, в). Після того як вісь обертового ротора перетне вісь полюсів статора 2—4, датчики ДХ1 і ДХ2 виявляться в зоні полюса ротора S, що приведе до включення транзисторів VT3 й VT4. Подальшу роботу елементів схеми БДПТ (мал. 30.8) до завершення вектором потоку Φ одного оберту простежимо по табл. 30.1 і мал. 30.8, а — з.

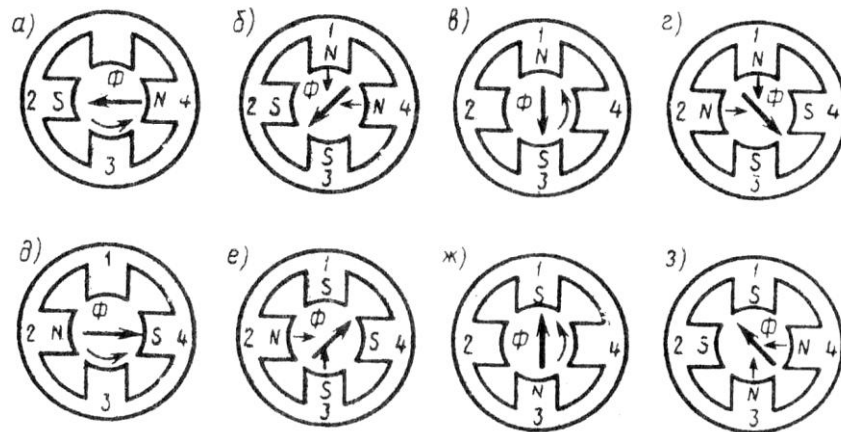


Рис. 30.8. Магнітне поле статора в чотирьохполюсном БДПТ

На мал. 30.9 показаний пристрій розглянутого БДПТ. Датчики Холу 3 розміщені в спеціальних пазах полюсних наконечників 1 сердечника статора.

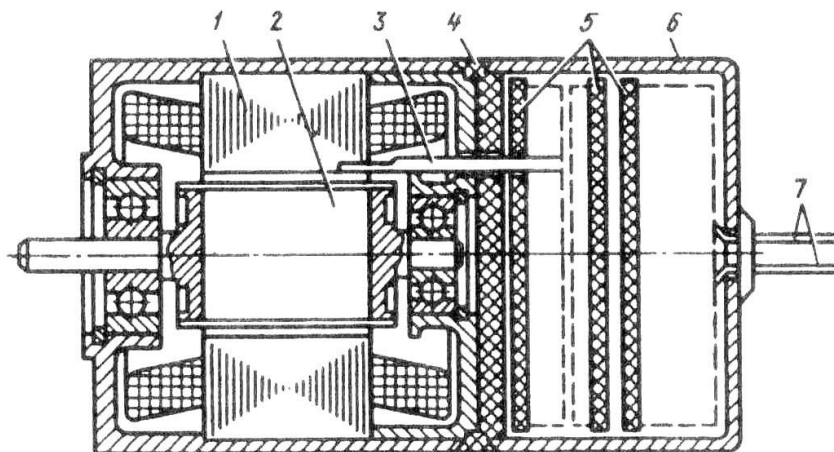


Рис. 30.9. Пристрій БДПТ

Постійний магніт 2 не має центрального отвору для посадки на вал, він заставляється в тонкостінну гільзу й закривається приварюють фланцями, що, двох півосей. Така конструкція ротора дозволяє уникнути виконання центрального отвору в постійному магніті, що часто є причиною шлюбу (тріщини, відколи й т.п.). Блок комутатора (БК) розташований на панелях 5, відділений від двигуна перегородкою 4 і закритий металевим ковпаком 6, через який виведені проведення 7 для підключення двигуна в мережі постійного струму. Подібна конструкція застосована в БДПТ корисною потужністю від 1 до 120 Вт.

Таблиця 30.1

Позиція на мал. 30.8	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>a</i>
Відкрито транзистори	<i>VT2</i>	<i>VT2, VT3</i>	<i>VT3</i>	<i>VT3, VT4</i>	<i>VT4</i>	<i>VT4, VT1</i>	<i>VT1</i>	<i>VT1, VT2</i>	<i>VT2</i>
Струм <i>i</i> проходить по фазних котушках	w_2	w_2, w_3	w_3	w_3, w_4	w_4	w_1, w_4	w_1	w_1, w_2	w_2
Кут повороту вектора потоку статора, град	0	45	90	135	180	225	270	315	360

Зміна напрямку обертання (реверс) двигуна здійснюється зміною полярності напруги U_1 в струмовому ланцюзі датчиків Холу. Зміна полярності напруги U на вході двигуна неприпустимо, тому що при цьому припиняється робота блоку комутатора.

Коефіцієнт корисної дії БДПТ у порівнянні з колекторними двигунами постійного струму вище, що порозумівається відсутністю щітково-колекторного вузла, а виходить, електричних втрат у щітковому контакті й механічних втратах у колекторі.

До достоїнств БДПТ ставляться також висока надійність і довговічність, що порозумівається відсутністю в них щітково-колекторного вузла, тобто їхньою безконтактністю. Двигуни можуть працювати в умовах широкого діапазону температур навколишнього середовища, у вакуумі, у середовищах з великою вологістю й т.п., де застосування колекторних двигунів неприпустимо через непрацездатність щітково-колекторного вузла.

Недолік БДПТ - підвищена вартість, обумовлена наявністю напівпровідникового блоку комутатора, чутливих елементів (датчиків ЕДС Холу) і постійного магніту.

Самостійна робота №51

Тема: Виконавчі двигуни постійного струму.

Мета: ознайомитися з областю застосування та особливостями будови виконавчих двигунів постійного струму.

Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Область застосування та особливості будови виконавчих двигунів постійного струму
- 2 Обмотки збудження різних типів виконавчих двигунів

Література: Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 496 с.

Питання для самоконтролю:

- 1 Які вимоги висуваються до виконавчих двигунів постійного струму?
- 2 Які види обмоток застосовуються у виконавчих двигунів постійного струму?
- 3 Яка область застосування виконавчих двигунів постійного струму?
- 4 Чим саме по конструктивним ознакам виконавчі двигуни постійного струму відрізняються від двигунів постійного струму?
- 5 Зарисуйте схему ввімкнення в мережу виконавчих двигунів постійного струму; поясніть її.
- 6 Опишіть будову малоінерційних виконавчих двигунів постійного струму з порожнім якорем.
- 7 Які переваги та недоліки малоінерційних виконавчих двигунів постійного струму?

1 Область застосування та особливості будови виконавчих двигунів постійного струму

Виконавчі двигуни постійного струму, так само як виконавчі асинхронні двигуни, застосовуються в системах автоматики для перетворення електричного сигналу в механічний рух. Крім звичайних вимог, пропонованих до електродвигунів загального призначення, до виконавчих двигунів пред'являється ряд специфічних вимог, з яких основними є відсутність самоходу й малоінерційність.

Майже всі виконавчі двигуни (виключення становлять лише двигуни з постійними магнітами) мають дві обмотки. Одна з них постійно підключена до мережі й називається *обмоткою збудження*, на іншу — *обмотку керування* електричний сигнал подається лише тоді, коли необхідно викликати обертання вала. Від напруги керування залежать частота обертання й обертаючий момент виконавчого двигуна, а отже, і механічна потужність, що розвивається ним.

Виконавчі двигуни постійного струму по конструкції відрізняються від двигунів постійного струму загального призначення тільки тим, що мають шихтовані (набрані з аркушів електротехнічної сталі) якір, станину й полюси, що необхідно для роботи виконавчих двигунів у перехідних режимах. Магнітне коло виконавчих двигунів не насичене, тому реакція якоря практично не впливає на їхні робочі характеристики.

Як виконавчі двигуни постійного струму в цей час використовують найчастіше двигуни з незалежним збудженням, рідше - двигуни з постійними магнітами. У двигунів з незалежним збудженням як обмотка керування використовується або обмотка якоря - двигуни з якірним керуванням, або обмотку полюсів - двигуни з полюсним керуванням.

2 Обмотки збудження різних типів виконавчих двигунів

У виконавчих двигунів з якірним керуванням обмоткою збудження є обмотка полюсів, а обмоткою керування — обмотка якоря (мал. 30.10, а). Обмотку збудження підключають до мережі з постійною напругою U_B на увесь час роботи автоматичного пристрою. На обмотку керування подають сигнал (напруга керування) лише тоді, коли необхідно викликати обертання якоря двигуна. Від напруги керування залежать обертаючий момент і частота обертання двигуна. При зміні полярності напруги керування міняється напрямок обертання якоря двигуна.

У виконавчих двигунів з полюсним керуванням обмоткою керування є обмотка полюсів, а обмоткою збудження — обмотка якоря (мал. 30.10, б). Якір двигуна постійно підключений до мережі з напругою $U_B = const$. Для обмеження струму іноді послідовно з якорем включають додаткове (баластове) опір R_d . На обмотку полюсів напруга керування U_y , (сигнал) подають лише тоді, коли необхідно викликати обертання якоря.

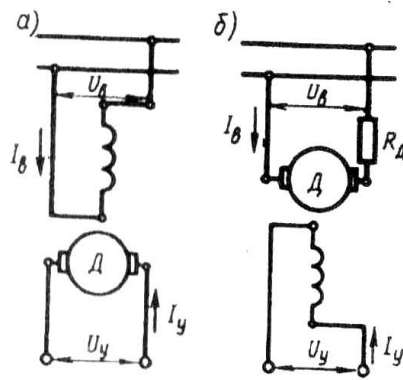


Рис. 30.10. Схема включення виконавчих двигунів постійного струму

Виконавчі двигуни постійного струму звичайної конструкції мають істотний недолік — сповільненість перехідних процесів, тобто відсутність малоінерционності. Порозумівається це в основному двома причинами: наявністю масивного якоря зі сталевим сердечником, що володіє значним моментом інерції, і значною індуктивністю L_a обмотки якоря, покладеної в пази сердечника якоря. Остання причина сприяє збільшенню електромагнітної постійної часу $T = L_a / \Sigma r$. Зазначені недоліки відсутні у *двигунах із гладким (порожнім) якорем* (мал. 30.11). Станина 1 і полюси 3 ці двигуни звичайні. Порушення двигуна здійснюється або за допомогою обмотки збудження 2, або постійними магнітами.

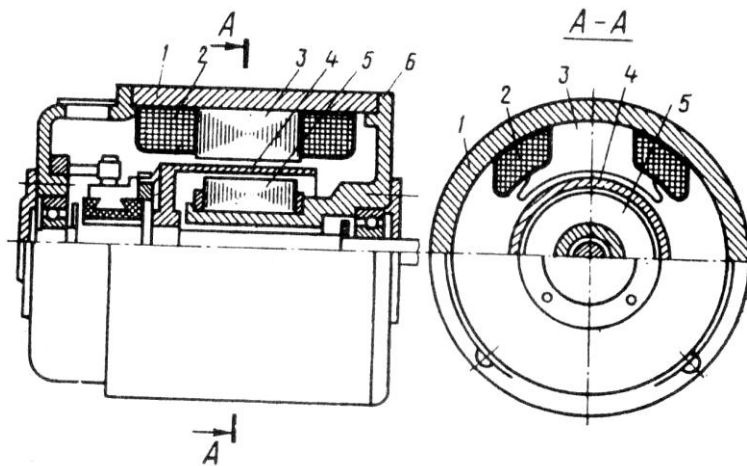


Рис. 30.11. Малоінерційний виконавчий двигун постійного струму з порожнім якорем

Для зменшення моменту інерції якоря його обмотка відділена від масивного феромагнітного сердечника, останній виконаний нерухомим (внутрішній статор 5) і розташований на циліндричному виступі підшипникового щита 6.

Обмотка якоря в процесі виготовлення укладається на циліндричний каркас, а потім заливається пластмасою. Готовий якір 4 являє собою порожню склянку, що складається із провідників обмотки, зв'язаних воедино пластмасою. Кінці секцій обмотки, як й у звичайному двигуні, з'єднуються із пластинами колектора, що є частиною дна порожньої склянки якоря 4. Обертний вузол двигуна із гладким якорем складається з вала, колектора й обмотки якоря, залитою пластмасою.

Момент інерції порожнього якоря значно менше моменту інерції звичайного якоря, що забезпечує гарну швидкодію двигуна. Крім того, індуктивність обмотки якоря знижується, що також сприяє підвищенню швидкодії двигуна. До того ж зниження індуктивності обмотки поліпшує комутацію двигуна за рахунок зменшення реактивної ЕРС (див § 27.4).

Недолік розглянутого малоінерційного двигуна з порожнім якорем - наявність великого немагнітного проміжку між полюсами статора й нерухомим феромагнітним сердечником - внутрішнім статором. Цей проміжок складається із двох повітряних зазорів і товщини склянки якоря (товщини шаруючи обмотки якоря). Наявність великого немагнітного проміжку на шляху магнітного потоку вимагає значного збільшення МРС порушення, що приводить, по-перше, до збільшення габаритів двигуна через збільшення обсягу обмотки збудження, а по-друге, до росту втрат на нагрівання обмотки збудження. Однак ККД двигуна з порожнім якорем внаслідок відсутності втрат у сталі сердечника якоря практично перебуває на тій же рівні, що й у звичайних двигунах, а у випадку застосування для порушення постійних моментів значно перевершує ККД останніх.