

**Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев, В.М. Смуригін,
О.В. Ковальов, А.В. Вужицький**

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**Рекомендовано Міністерством аграрної політики та продовольства
України як навчальний посібник для студентів аграрних вищих
навчальних закладів І–ІІ рівнів акредитації зі спеціальностей
5.10010101 “Обслуговування устаткування та систем тепло-
енергопостачання в агропромисловому комплексі”
і 5.10010102 “Монтаж, обслуговування та ремонт
електротехнічного устаткування в агропромисловому
комплексі”**

**Київ
Аграрна освіта
2013**

УДК 621.3.061

*Гриф надано Міністерством аграрної
політики та продовольства України
(лист № 18-1-28/2004 від 07.12.2011 р.)*

Р е ц е н з е н т и :

Яковенко В.В., професор, д.т.н., завідувач кафедри “Електромеханіка”
Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля;
Діордієв В.Т., професор, к.т.н., завідувач кафедри “Автоматизація
сільськогосподарського виробництва” Таврійського ДАТУ;
Горбуліч О.М., викладач ВП “Політехнічний коледж Луганського НАУ”;
Матвіюк П.Л., викладач Володимир-Волинського агротехнічного коледжу;
Булах В.В., Семенков Є.Б., викладачі ВСП “Новокаховський коледж
Таврійського ДАТУ”;
Кривошанко Е.А., викладач Хорольського агропромислового коледжу
Полтавської ДАА

Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко,
В.Ф. Яковлєв та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.

ISBN 978-966-2007-38-1

Розглянуто основні закони електротехніки в теорії електричних апаратів і машин. Представлено конструкції та принцип роботи машин постійного струму, трансформаторів, асинхронних та синхронних машин. Узагальнено технології виготовлення цих машин з використанням сучасних електротехнологій.

У додатках наведено технічні дані сухих силових трансформаторів з литою ізоляцією, електроприводів змінного струму, комутаційної та захисної апаратури.

Навчальний посібник “Електричні машини і апарати” призначений для студентів аграрних вищих навчальних закладів І–ІІ рівнів акредитації та буде корисним для інженерно-технічних працівників, які пов’язані з експлуатацією електротехнічного устаткування.

ISBN 978-966-2007-38-1

© Куценко Ю.М., Яковлєв В.Ф.,
Смуригін В.М., Ковальов О.В.,
Вужицький А.В., 2013

ЗМІСТ

Передмова.....	5
1 Загальні відомості про електричні апарати і електричні машини	6
1.1 Визначення і класифікація електричних апаратів і машин.....	6
1.2 Електротехнічні матеріали, які застосовуються при виробництві електричних машин.....	9
1.3 Основні закони електротехніки в теорії електричних апаратів і електричних машин.....	11
1.4 Нагрівання електричних апаратів і машин	23
1.5 Режим роботи електричних апаратів та електричних машин	40
1.6 Стандартизація	48
1.7 Електричні апарати захисту та керування	57
2 Машини постійного струму	63
2.1 Будова і принцип дії машин постійного струму	63
2.2 Обмотки якоря	75
2.3 Реакція якоря	85
2.4 Явище комутації в машинах постійного струму	90
2.5 Генератори постійного струму	108
2.6 Двигуни постійного струму	122
2.7 Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії машин постійного струму	143
2.8 Мікромашини постійного струму	147
3 Трансформатори	156
3.1 Загальні відомості про трансформатори	156
3.2 Робочий процес трансформатора	159
3.3 Елементи конструкції трансформаторів	199
3.4 Схеми і групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів	214
3.5 Паралельна робота трансформаторів	218
3.6 Спеціальні типи трансформаторів	223

4 Асинхронні машини	239
4.1 Будова і принцип дії асинхронного двигуна	239
4.2 Робочий процес трифазної асинхронної машини	247
4.3 Обертальний момент асинхронного двигуна	265
4.4 Регулювання частоти обертання і пуск у хід трифазних асинхронних двигунів	280
4.5 Однофазні асинхронні двигуни	302
4.6 Асинхронні генератори	313
4.7 Індукційні регулятори і фазорегулятори	316
4.8 Обертові перетворювачі	322
4.9 Асинхронні мікромашини	325
 5 Синхронні машини	 339
5.1 Особливості генераторів автономних систем	339
5.2 Будова синхронної машини	347
5.3 Обмотки машин змінного струму	351
5.4 Збудження синхронних генераторів	358
5.5 Реакція якоря синхронного генератора	361
5.6 Характеристики синхронного генератора	369
5.7 Паралельна робота синхронних генераторів	374
5.8 Синхронні двигуни і компенсатори	384
5.9 Синхронні мікромашини	395
Глосарій	408
Література	411
Додатки	415

ПЕРЕДМОВА

Сучасний стан розвитку агропромислового комплексу України визначається енерго- і електроозброєністю технологічних процесів, де вирішальну роль відіграють електричні машини.

Електрична машина – головний елемент будь-якої енергетичної установки, тому для спеціалістів, що працюють в сфері виробництва або експлуатації електричних машин, необхідні знання не тільки теорії і розуміння фізичної сутності електромагнітних, механічних та теплових процесів, що протікають в електричних машинах. Не менш важливим є уміння розбиратися в різноманітних конструктивних формах та виконаннях електричних машин, навички розрахунку необхідної потужності і вибору типорозміру електричної машини з урахуванням її технічних даних і конструктивного виконання за ступенем захисту та способом охолодження, виду монтажу, а також кліматичних умов експлуатації.

Електричні машини – це основний елемент електроенергетичного устаткування і обладнання. Вони використовуються для виробництва електричної енергії (генератори), її перетворення з метою передачі і подальшого застосування (трансформатори) та приведення в дію робочих машин і механізмів (двигуни).

Останнім часом має місце значне зростання розвитку виробництва та транспорту на базі електрифікації. До трансформаторів та обертових електричних машин ставляться більш високі вимоги: підвищення енергетичних показників, економічності, зменшення маси та габаритних розмірів. Проводиться велика робота щодо вивчення електромагнітних та теплових процесів, що відбуваються в трансформаторах та обертових електричних машинах, розробки нових електроізоляційних та провідникових матеріалів, а також покращення властивостей електротехнічних сталей.

Електромеханічне перетворення енергії супроводжується обов'язковим перетворенням електричної або механічної енергії в теплову. Розвиток сучасної теорії електромеханічного перетворення енергії дозволяє скласти математичне описання будь-якого процесу перетворення енергії.

В запропонованому навчальному посібнику розглянуті основні закони та процеси в електричних машинах у сталих та перехідних процесах. Порядок викладення матеріалу подібний до порядку, прийнятого у більшості навчальних видань з електричних машин для електроенергетичних спеціальностей.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ І ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

1.1 ВИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ І МАШИН

Електричні апарати

Електричний апарат – це електротехнічний пристрій для управління потоками енергії та інформації, режимами роботи, контролю і захисту технічних систем та їх компонентів.

Електричні апарати призначені для комутації електричних кіл, контролю, виміру, захисту, керування і регулювання установок, призначених для передачі, перетворення, розподілу і споживання електроенергії [1].

На рисунку 1.1 (кольорова вкладка) показано цифровий аналізатор параметрів мережі ДММ-3Т, призначений для моніторингу параметрів окремих фаз трифазної електромережі – напруги, струму, частоти, повної потужності, активної та реактивної складових повної потужності, а також значення коефіцієнту потужності [2].

Класифікацію електричних апаратів доцільно виконувати за принципом дії з урахуванням елементної бази:

- *електромеханічні;*

Основною ознакою електромеханічних апаратів є наявність рухомих частин – контактної системи, що виконує комутацію електричного кола.

- *статичні;*

Основною ознакою є наявність електронних компонентів, а також магнітних підсилювачів, дроселів насичення. Апарати у більшості випадків відносяться до силових електронних пристроїв для управління потоками електричної енергії.

- *гібридні;*

Гібридні електричні апарати поєднують в собі комбінацію електромеханічних та статичних апаратів.

За призначенням апарати діляться на групи:

- *комутаційні апарати розподільних пристроїв;*

Призначені для комутації електричних кіл (рубильники, пакетні вимикачі, вимикачі навантаження, вимикачі високої напруги,

Електричні машини і апарати

роз'єднувачі, відокремлювачі, короткозамикачі, автоматичні вимикачі, запобіжники). Для цієї групи характерно відносно рідке їх вмикання і вимикання.

- *обмежуючі апарати;*

Призначені для обмеження токів короткого замикання (реактори) і перенапруги (розрядники). Режими к.з. і перенапруг є аварійними.

- *пускорегулюючі апарати;*

Призначені для пуску, регулювання частоти обертання, напруги і струму електричних машин або інших споживачів енергії. До цієї групи відносяться контролери, командоконтролери, контактори, пускачі, резистори і реостати. Характерна риса – часті вмикання і відключення (близько 3600 за годину і більше).

- *контролюючі апарати електричних або неелектричних параметрів (реле і датчики);*

Для реле характерна плавна зміна величини, що контролюється, яка викликає стрибкоподібну зміну вихідної величини. У датчиках плавна зміна вхідної величини перетворюється у плавну зміну (вимірювальні датчики) або стрибкоподібну (реле-датчики) вихідної величини.

- *вимірювальні апарати;*

За допомогою кола первинної комутації (головного струму) ізолюють вимірювальне коло від нього, а величина, що вимірюється набуває стандартного значення (трансформатори струму, напруги, ємнісні дільники напруги).

- *електричні регулятори;*

Призначені для регулювання заданого параметра за визначеним законом.

Розподіл апаратів за областю застосування умовне, тому що одні і ті ж апарати можуть бути віднесені до різних груп.

Класифікація апаратів у межах групи:

- *за напругою:*

- а) низької (до 1000 В включно)
- б) високої (від 1000 В і вище);

- *за родом струму:*

- а) постійного;
- б) змінного промислової частоти;
- в) змінного підвищеної частоти;

- *за родом захисту від навколишнього середовища:*

- а) відкриті;
- б) захищені;
- в) брызкозахищені;
- г) водозахищені;
- д) герметичні;
- е) вибухонебезпечні й ін.

- *за принципом дії:*

- а) електромагнітні;
- б) магнітоелектричні;
- в) індукційні;
- г) теплові й інші;

- *за іншими факторами:*

- а) швидкодія;
- б) засоби гасіння дуги й ін.

За режимом комутації:

- *нормальним режимом комутації;*

Контакт електричного апарату комутує коло багаторазово.

- *режимом граничної (рідкої) комутації;*

Контакт комутує коло декілька разів або декілька десятків разів.

Категорії застосування комутаційних низьковольтних апаратів.

Відповідно до ГОСТ 12434-83 всі можливі області використання низьковольтних комутаційних апаратів класифікуються категоріями застосування (додаток А).

Електричні машини

Електричні машини (кольорова вкладка, рис. 1.2) – *це електромеханічні пристрої для перетворення механічної енергії на електричну чи електричної на механічну, або електричної енергії одного роду і параметрів на інші за посередництвом електромагнітної індукції.*

Електричні машини можна класифікувати за наступними ознаками [4,5]:

- *принципом дії:*

а) машини постійного струму:

- 1) колекторні машини;
- 2) індукторні машини.

б) машини змінного струму:

1) синхронні:

- явно полюсні;

- неявно полюсні.

2) асинхронні:

- з фазним ротором;

- з короткозамкненим ротором (кольорова вкладка, рис. 1.2).

3) колекторні.

- *за призначенням;*

а) генератори;

б) двигуни;

в) електромашинні підсилювачі;

г) електромеханічні перетворювачі сигналів;

д) індукційні машини;

- *за потужністю:*

а) мікромашини до 500 Вт;

б) малої потужності від 0,5 до 10 кВт;

в) середньої потужності від 20 до 200 кВт;

г) великої потужності більш ніж 200 кВт.

До підгрупи електротехнічних машин відносяться також статичні електромагнітні пристрої – електричні трансформатори, оскільки фізичні явища, що протікають у них, відповідають природі електромагнітних процесів.

1.2 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Як активна сталь трансформаторів застосовують високолеговану гарячекатану або підвищено леговану холоднокатану електротехнічну сталь завтовшки 0,35 і 0,5 мм.

Для сучасного виробництва електричних двигунів досить часто використовують електротехнічну сталь марки 2212 з покриттям типу “Изорт”.

Найширше використання з конструкційних матеріалів мають: листову сталь марки М12кп (МСт. 2) і М18 (МСт. 3), профільний прокат (кутова сталь, швелери і ін.) марки М18 і сталь для кріпильних деталей; шпильки, болти і гайки виготовляють в основному із сталі марки 20, А12 і М18. Для деяких частин, найбільш відповідальних відносно механічної міцності, застосовують сталь марки М21 (МСт. 4).

Листова сталь марки М12кп найбільш придатна для отримання маслощільних швів електрозварювань (баки, розширювачі й інші частини масляних трансформаторів); якісні маслощільні шви можуть бути отримані при сталі М18 [6].

Марка 304 AISI є найбільш універсальною і найширше використовуваною з усіх марок нержавіючих сталей для двигунів заглибних насосів. Аналог сталі 304 AISI за ГОСТ – 08Х18Н10, 304 L AISI – 03Х18Н11 [7].

Для станин електродвигунів, кришок, фланців, щитів застосовують нелегований чавун марки СЧ 12-28 і СЧ 15-32 з високим вмістом вуглецю і кремнію і підвищеним (до 0,5 %) вмістом фосфору.

Для виготовлення магнітних осердь трансформаторів використовують текстуровану сталь, яка ізолюється карлітом, що зрізаний під кутом 45° за методом “step-lap”.

Обмотки НН виготовляють із алюмінієвої фольги, з використанням ізоляції, що просочена епоксидною смолою класу “Н”. При виготовленні використовується епоксидна смола класу “F” [8,9,10].

Для провідників, струмопровідних частин вводів, включаючи гайки і шайби, використовують мідь марки МІ, МІТ, МІМ і латунь марки Л059-1, Л62, ЛК80-ЗЛ. Високоякісний емаль-провід – для системи обмоток марок ПЭТ-155, ПЭЭИ2-180 МЭК, ПЭЭДХ2-200 МЭК [11,12,13,14,15].

Для виробництва корпусів трансформаторів струму використовують термопластики, які не підтримують горіння, згідно із міжнародними нормами UL94-V0, клас ізоляції обмоток E-120 С° [16,17].

У процесі виробництва ізоляційних матеріалів застосовуються матеріали наступних класів нагрівостійкості відповідно до ГОСТ 8865 [5,18,19,20].

Клас Y (температура нагріву 90°).

Волокнисті матеріали із целюлози, бавовни або натурального, штучного й синтетичного шовку, не просочені й не занурені в рідкий електроізоляційний матеріал.

Клас А (температура нагріву 105°).

Волокнисті матеріали із целюлози, бавовни або натурального, штучного й синтетичного шовку, у робочому стані просочені або занурені в рідкий електроізоляційний матеріал.

Клас Е (температура нагріву 120°).

Синтетичні органічні матеріали: плівки, волокна, смоли, компаунди.

Клас В (температура нагріву 130°).

Матеріали на основі слюди, азбесту чи скловолокна з органічними просочувальними сумішами, емалева ізоляція проводів типу ПЭТВ, ПЭТВД та інш.

Клас F (температура нагріву 155°C).

Матеріали, що вказані у класі В, із слюди, скловолокна, азбесту, але без підложки, емалева ізоляція проводів типу ПЭТ-155, ПЭТВ-155, ПЭД на основі капрону.

Клас Н (температура нагріву 180°C).

Матеріали: кремнійорганічні еластомери, ізоляція із скловолокна та азбесту проводів типу ПСДК, ПСДКТ, емалева ізоляція проводів типу ПЭТ-200, ПЭТВ-200 та ін.

Клас С (температура нагріву понад 180 °C).

Матеріали: скло, слюда, скловолокнисті матеріали, кварц, полімідні та інші композиційні матеріали. Кремнійорганічні та елементоорганічні лаки та смоли.

1.3 ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ В ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ І ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Закон Джоуля-Ленца

У процесі протікання електричного струму по однорідному провіднику відбувається переміщення заряду, який взаємодіє з електронами та іонами. При цьому виконується елементарна робота силами електричного поля [21,22,23]

$$dA = U \cdot dq = I \cdot U \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt = \frac{U^2}{R} \cdot dt, \quad (1.1)$$

де U – напруга на ділянці електричного кола, В;

dq – величина заряду, що переміщується по провіднику, Кл;

I – сила електричного струму на ділянці кола, А;

dt – зміна часу, за який електричний струм протікає по провіднику, с;

R – опір провідника ділянки електричного кола, Ом.

Зі співвідношення $P = \frac{dA}{dt}$ потужність має вигляд

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \quad (1.2)$$

Якщо $P > 0$, то ділянка одержує енергію від зовнішньої частини кола. У протилежному випадку вона віддає (генерує) енергію.

Розглянемо однорідну ділянку кола з нерухомими провідниками, через яку проходить електричний струм (рис. 1.3).

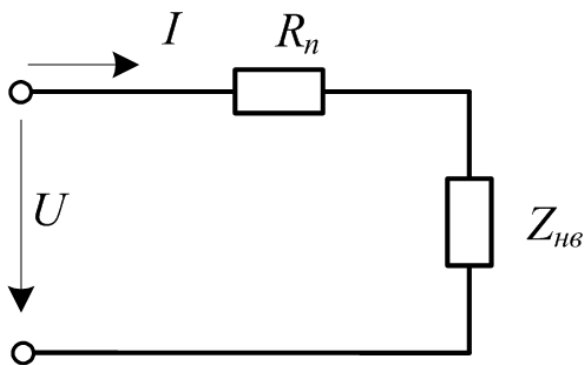


Рис. 1.3 – Однорідна ділянка електричного кола зі струмом

На даній ділянці енергія електричного струму переходить у внутрішню енергію. Збільшення внутрішньої енергії призводить до підвищення температури. Провідник, по якому протікає струм, нагрівається і віддає теплоту навколишньому середовищу. За законом збереження енергії

$$dQ = dA = I \cdot U \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt = \frac{U^2}{R} \cdot dt, \quad (1.3)$$

де dQ – теплова енергія, яка виділяється у провіднику, Дж.

Дане рівняння є законом Джоуля-Ленца.

В інтегральній формі закон Джоуля-Ленца має наступний вигляд

$$Q = \int_0^i I^2 \cdot R \cdot dt \quad (1.4)$$

У випадку, коли $I = \text{const}$, то $Q = I^2 \cdot R \cdot t$.

Відповідно до закону Джоуля-Ленца, кількість теплоти, яка виділяється у провіднику під час проходження по ньому електричного струму, пропорційна величині опору провідника, квадрату сили електричного струму та часу протікання струму по провіднику.

Визначимо потужність з урахуванням закону Джоуля-Ленца до малого елемента фізично нескінченного об'єму dV (рис. 1.4) провідного середовища, через яке проходить електричний струм.

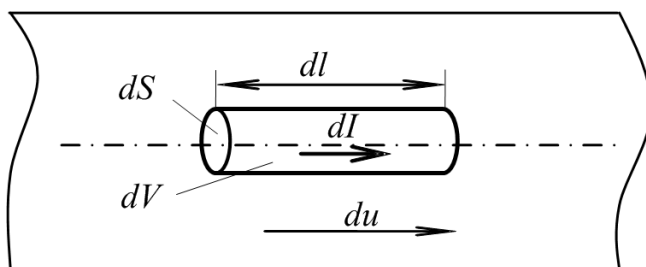


Рис. 1.4 – Провідне середовище з нескінченно малим елементом об'єму

Визначимо потужність, яка перетворюється на теплоту в об'ємі

$$dp = du \cdot dl, \quad (1.5)$$

де du – змінне значення напруги, В;

$$du = E \cdot dl, \quad (1.6)$$

де E – електрорушійна сила, В;

dl – довжина провідника, м;

dI – змінне значення сили струму, А.

$$di = J \cdot dS, \quad (1.7)$$

де J – густина струму, А/м²

dS – переріз провідника зі струмом, м².

$$dp = E \cdot dl \cdot J \cdot dS \quad (1.8)$$

Враховуючи, що елементарний об'єм дорівнює $dV = dl \cdot dS$, а щільність струму $J = \gamma \cdot E$, отримаємо потужність, що віднесена до одиниці об'єму

$$dp' = \gamma \cdot E^2, \quad (1.9)$$

де γ – питома провідність середовища.

Питома теплова потужність визначається за співвідношенням

$$\theta_{\text{num}} = \frac{dP}{dV} = \gamma \cdot E^2 \quad (1.10)$$

Дане співвідношення визначає закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі.

Магнітна індукція

Магнітна індукція $\vec{B}$ – векторна величина, яка є силовою характеристикою магнітного поля у даній точці простору. Показує з якою силою $\vec{F}$ магнітне поле діє на заряд q , що рухається зі швидкістю $\vec{v}$.

Експериментально доведено, що механічна дія магнітного поля на рухомий електричний заряд залежить від значення заряду, його полярності, швидкості й напрямку руху, а також від інтенсивності поля.

У загальному випадку неоднорідного поля й скінченних значень носіїв заряду величина магнітної індукції визначається

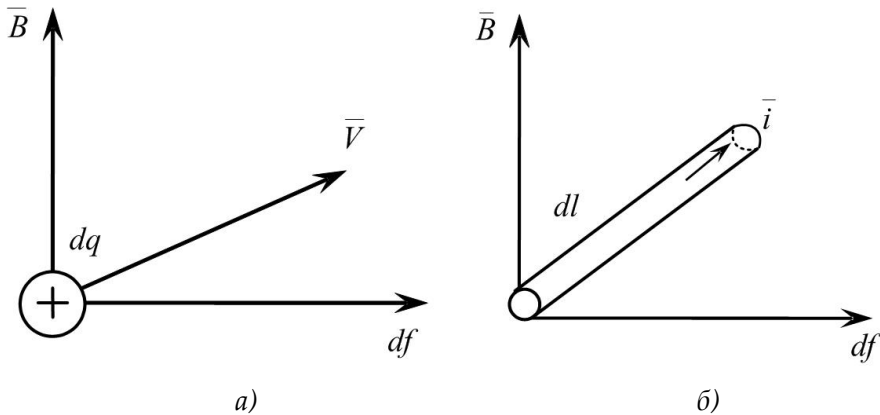
$$B = \lim_{\Delta Q \rightarrow 0} \frac{\Delta f_{\text{max}}}{\Delta Q \cdot V} = \frac{df_{\text{max}}}{dQ \cdot V}, \quad (1.11)$$

де B – модуль вектора магнітної індукції;

Δf_{max} – градієнт дії сили магнітного поля на заряд.

Вектор магнітної індукції $\vec{B}$ не залежить від значення пробного заряду та його швидкості, а також від напрямку руху пробного заряду.

За напрям вектора індукції $\vec{B}$ вибирають той, який, характеризуючи поле, визначає напрям механічної сили. Сила завжди перпендикулярна до цього напрямку і напрямку руху заряду (рис. 1.5, а). Отже, **магнітна індукція – фізична векторна величина, що є силовою характеристикою магнітного поля в даній точці і чисельно дорівнює границі відношення механічної сили, що діє на рухомий заряд, до добутку заряду на його швидкість, якщо значення заряду наближається до нуля і заряд рухається в такому напрямі, що ця границя має найбільше значення.**



а) сили взаємодії магнітного поля; б) векторне зображення магнітної індукції та елемент провідника з електричним струмом

Рис. 1.5 – Графічне визначення напрямку дії магнітної індукції

Магнітна індукція направлена перпендикулярно до механічної сили й до напрямку руху заряду таким чином, що вектори сили, швидкості та магнітної індукції $\vec{df}$, $\vec{V}$ і $\vec{B}$ створюють систему за правилом правого гвинта.

Одиниця вимірювання магнітної індукції – Тесла (Тл): $[B] = 1 \text{ Тл}$.

Магнітна індукція через елемент провідника з електричним струмом (рис. 1.5, б) визначається за виразом

$$dQ\vec{V} = idt \frac{d\vec{l}}{dl} = i d\vec{l} \quad (1.12)$$

При цьому магнітна індукція

$$B = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta f_{\max}}{i \Delta l} = \frac{df_{\max}}{i dl} \quad (1.13)$$

Сила, що діє на рухомий заряд у магнітному полі, визначається за виразом

$$\vec{df} = dQ[\vec{V}\vec{B}] \text{ або } \vec{df} = i[d\vec{l}\vec{B}] \quad (1.14)$$

Для прямолінійного провідника, який рухається в однорідному магнітному полі за умови, що dl перпендикулярна B , сила дорівнює $F = B \cdot l \cdot i$.

Напрямок електромагнітної сили зручно визначати, користуючись правилом лівої руки (рис. 1.6): якщо руку розташувати так, щоб струм йшов вздовж напрямку пальців, а магнітні лінії входили в долоню, то великий палець вкаже напрям сили.

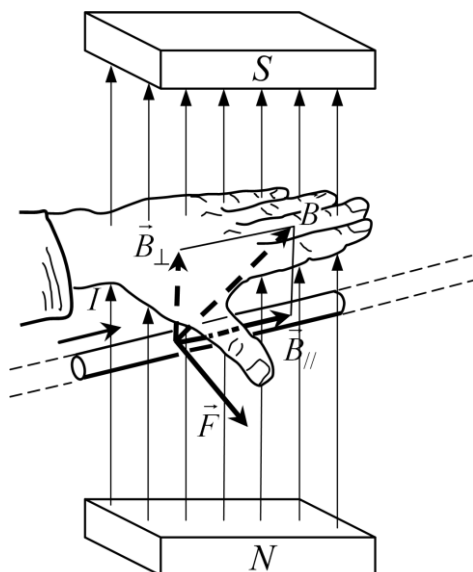


Рис. 1.6 – Визначення напрямку електромагнітної сили за допомогою правила лівої руки

Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік) визначається

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B \cos \alpha dS \quad (1.15)$$

або

$$d\Phi = \vec{B} d\vec{S} = B \cos \alpha dS \quad (1.16)$$

Якщо магнітна індукція перпендикулярна до площини перетину поверхні, через яку розглядається потік $\cos \alpha = 1$, $B = d\Phi \cdot l \cdot dS$, магнітна індукція чисельно дорівнює густині магнітного потоку.

Одиниця вимірювання магнітного потоку – Вебер (Вб): $[\Phi] = 1 \text{ Вб}$.

Фізичною властивістю магнітних ліній магнітного поля є замкненість, що виражається принципом неперервності магнітного потоку

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (1.17)$$

Закон електромагнітної індукції

Магнітне поле впливає на позитивні й негативні заряди у провіднику, що рухається у полі, і призводить до їх роз'єднання. Сторонні сили (сили магнітного поля) визначаються відповідно

$$\vec{df} = dQ[\vec{V}\vec{B}]; \quad \vec{E}_{cm} = \frac{\vec{df}}{dQ} = [\vec{V}\vec{B}] \quad (1.18)$$

Електрорушійну силу, яка індукується у провіднику, визначають за виразом

$$e = \int_l E_{cm} \vec{dl} = \int_l [\vec{V}\vec{B}] \vec{dl}, \quad (1.19)$$

або

$$de = [\vec{V}\vec{B}] \vec{dl} \quad (1.20)$$

У випадку, коли швидкість переміщення та індукція постійні $V = const$, $B = const$, вектор індукції перпендикулярний вектору швидкості $\vec{B} \perp \vec{V}$ і провідник прямолінійний, ЕРС буде дорівнювати $e = B \cdot l \cdot V$. Напрямок індукованої ЕРС визначають за правилом правої руки: руку розташовують так, щоб магнітні лінії входили в долоню, а великий палець вказував напрям руху, тоді ЕРС буде спрямована вздовж пальців руки (рис. 1.7).

Для прикладу проаналізуємо замкнений контур, що рухається у магнітному полі (рис. 1.8). У процесі руху контур за час dt змістився на відстань $\vec{dm}$. При цьому він опише поверхню, через яку протікає магнітний потік

$$\begin{aligned} d\Phi &= \oint_S \vec{B} d\vec{S} = \oint_l \vec{B} [d\vec{m} \vec{dl}] = \oint_l [\vec{B} d\vec{m}] \vec{dl} = - \oint_l [d\vec{m} \vec{B}] \vec{dl} = \\ &= - \oint_l [\vec{V} dt \vec{B}] \vec{dl} = -dt \oint_l [\vec{V} \vec{B}] \vec{dl} = -edt \end{aligned} \quad (1.21)$$

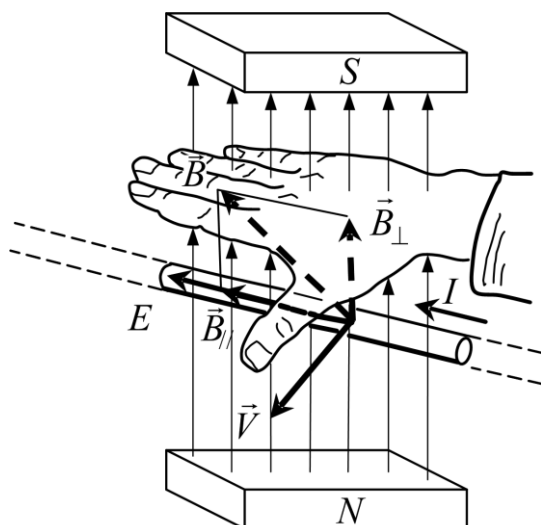


Рис. 1.7 – Визначення напрямку електрорушійної сили (ЕРС) за правилом правої руки

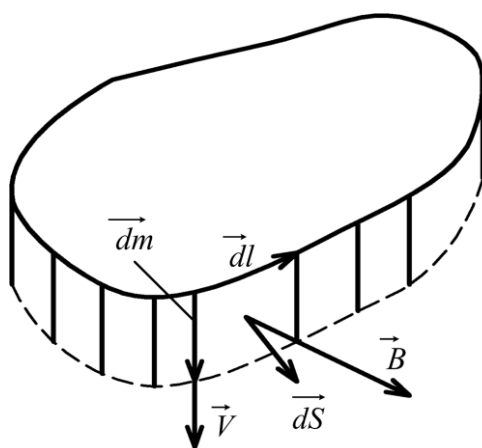


Рис. 1.8 – Замкнений контур з провідного матеріалу у магнітному полі

Розглянуте явище виникнення ЕРС у провіднику, що рухається в магнітному полі (постійному) або знаходиться у змінному магнітному полі, називають явищем електромагнітної індукції. Дане явище визначає закон електромагнітної індукції, а ЕРС, що створюється при цьому називаються – індукованою.

Згідно із законом електромагнітної індукції ЕРС $e = -d\Phi/dt$, яка виникає у замкнутому контурі в процесі електромагнітної індукції,

чисельно дорівнює від'ємному значенню швидкості зміни магнітного потоку, зчепленого з контуром.

За допомогою пробного контуру встановлюється картина магнітного поля струмів (рис. 1.9).

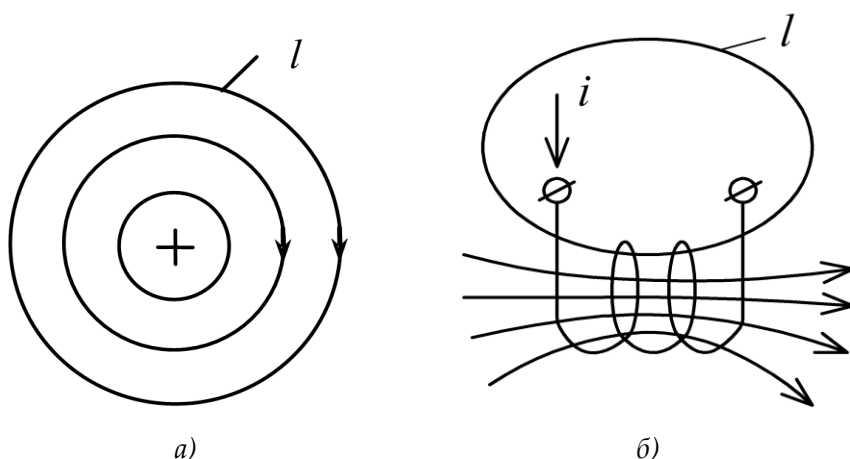
Навколо прямолінійного провідника з електричним струмом магнітні лінії-кола створюють зі струмом правогвинтову систему (рис. 1.9, а). Картину поля котушки зі струмом наведено на рисунку 1.9, б).

Отримуємо залежність для лінійного провідника зі струмом

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \pm \mu_i i, \quad (1.22)$$

де μ_i – магнітна проникність вакууму (магнітна стала), Гн/м;

l – контур інтегрування.



а) – напрям магнітних ліній навколо провідника з електричним струмом; б) – картина поля котушки зі струмом

Рис. 1.9 – Картина магнітного поля струмів

Знак “+” (рис. 1.9, а) наведено для випадку, коли напрям контуру інтегрування створює з напрямом струму правогвинтову систему. Для котушки з кількістю витків w маємо

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \cdot w \cdot i \quad (1.23)$$

Намагнічення та намагніченість речовини

Молекулярний (електричний) струм характеризує рух електричних зарядів у межах атомів і молекул. Молекулярні струми оточені зв'язаним з ними магнітним полем. Процес орієнтації струмів згідно з напрямом дії зовнішнього магнітного поля називають намагніченням речовини. Намагніченість є кількісною характеристикою процесу намагнічення.

Напрямок вектора намагніченості $\vec{M}$ пов'язаний з напрямом молекулярних струмів за правилом правого гвинта.

Фізична векторна величина, що характеризує намагнічення речовини, називається намагніченістю речовини. Вона чисельно дорівнює сумі молекулярних струмів на одиницю довжини лінії з урахуванням розташування точки у просторі таким чином, щоб дана сума була найбільшою.

Модуль вектора намагніченості визначається за формулою

$$\dot{I} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta i'}{\Delta l} = \frac{di'}{dl} \quad (1.24)$$

Співвідношення (1.24) характеризує явище в даній точці, якщо інтенсивність намагніченості змінюється у просторі. За умови, що $M \parallel dl$, паралельні, молекулярний струм дорівнює $di' = M \cdot dl$. В інших випадках $di' = M \cdot dl \cdot \cos \alpha = \vec{M} \vec{dl}$. Для лінії скінченної довжини молекулярний струм має значення

$$i' = \int_l \vec{M} \vec{dl}. \quad (1.25)$$

Напруженість магнітного поля

Напруженість магнітного поля – фізична векторна величина, що характеризує магнітне поле в даній його точці.

Характерною особливістю напруженості магнітного поля є те, що її лінійний інтеграл вздовж будь-якого замкненого контуру чисельно дорівнює зовнішньому струму, що пронизує поверхню, яка спирається на цей контур.

У загальному випадку, коли контур інтегрування проходить частково через середовище, слід враховувати його молекулярні струми (рис. 1.10)

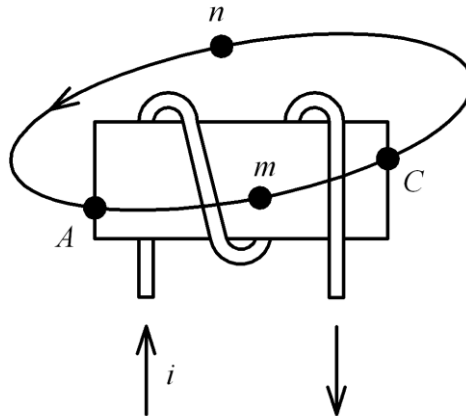


Рис. 1.10 – Зображення молекулярних струмів у середовищі

Молекулярні струми розраховуються за виразом

$$\oint_{AmCnA} \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 w i + \mu_0 i', \quad (1.26)$$

де i' – сумарний молекулярний струм, зчеплений з контуром інтегрування

$$i' = \int_{AmC} \vec{M} d\vec{l} = \oint_{AmCnA} \vec{M} d\vec{l} \quad (1.27)$$

Оскільки на ділянці AnC (рис. 1.10) намагнічуючої речовини немає, отримуємо залежність

$$\oint_l \left(\frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{M}}{\mu_0} \right) d\vec{l} = w i \quad (1.28)$$

Введемо позначення вектора напруженості $\vec{H}$ магнітного поля

$$\vec{H} = \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{M}}{\mu_0}, \quad (1.29)$$

отримаємо $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = w i$

Молекулярні струми враховуються при цьому самим вектором $\vec{H}$. Лінійний інтеграл $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = w i = F$ називають магніторушійною силою (МРС), або намагнічувальною силою.

Для відрізка шляху AmC у магнітному полі залежність $\oint_A^C \vec{H} d\vec{l} = F_{AC}$ є магнітною напругою вздовж лінії AC . Одиниця напруженості магнітного поля – ампер на метр (А/м): $[H] = 1 \text{ А/м}$.

Закон повного струму

Припустимо, що деякий контур охоплює кілька провідників зі струмами. Електричні струми, різні за природою походження, однаково спроможні створювати магнітне поле.

Лінійний інтеграл вектора напруженості магнітного поля дорівнює

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = i_{np} + i_{nep} + i_{zm} = i, \quad (1.30)$$

де i_{np} – струм провідності;

i_{nep} – струм переміщення;

i_{zm} – струм зміщення.

Струм, який складається із суми струмів $i = i_{np} + i_{nep} + i_{zm} = i$ називають повним.

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \oint_l \left(\sum_k \vec{B}_k \right) d\vec{l} = \sum_k \oint_l \vec{B}_k d\vec{l} \quad (1.31)$$

Кожен з інтегралів в цій сумі дорівнює $\mu_o I_k$. Таким чином

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_o \sum_k I_k \quad (1.32)$$

Даний вираз є математичним записом закону повного струму для вектора індукції магнітного поля [24,25] $\vec{B}$ у вакуумі ($\mu = 1$): циркуляція вектору магнітної індукції поля вздовж довільного замкнутого контуру L дорівнює добутку магнітної постійної на алгебраїчну суму струмів, охоплених цим контуром.

З метою аналізу параметрів магнітного поля використовують взаємозв'язки векторів магнітної індукції $\vec{B}$, напруженості магнітного поля $\vec{H}$ та намагніченості магнітного поля $\vec{M}$, $\vec{B} = \mu_o \vec{H} + \mu_o \vec{M}$.

1.4 НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ І МАШИН

Загальні відомості

Нагрівання електричних апаратів і машин є наслідком втрати частини енергії в машині в процесі перетворення її в інші види. Дотримання встановлених обмежень за допустимою температурою нагріву забезпечує нормативну тривалість служби електричних машин і апаратів. Допустимим тепловим режимом вважається такий режим роботи, при якому тривалість служби ізоляції T_i не буде меншою за передбачуваний. Тривалість служби ізоляції T_i суттєво залежить від температури нагрівання Θ_i .

Найбільш чутливою до перегріву є електрична ізоляція обмоток, у якій під дією високих температур відбувається теплове старіння, що погіршує її електричні та механічні властивості.

При перевищенні допустимої температури строк служби ізоляції різко скорочується. Згідно з даними досліджень німецького електротехніка К. Мондзінгера, перегрівання обмотки на 8°C скорочує строк служби її ізоляції вдвоє.

Значний перегрів машини негативно впливає на всі її елементи, наприклад, у ГПС колектор може втратити циліндричну форму, можуть вийти з ладу підшипники тощо.

Тому дуже важливо, щоб перевищення температури частин всієї машини були досить близькими до розрахункових робочих, визначених класом нагрівостійкості.

Втрати активної потужності в електричних машинах і апаратах проявляються у вигляді теплоти, яка частково розсіюється в навколишнє середовище, а частково підвищує температуру машини, і поділяються на втрати у струмопровідних, неструмопровідних феромагнітних частинах машини, ізоляції та інші.

Втрати активної потужності у струмопровідних частинах машини визначаються згідно із законом Джоуля-Ленца.

$$P = \int_0^t i^2 R dt \quad (1.33)$$

Під дією постійного струму нагрівання відбувається за рахунок втрат в активному опорі струмопровідного кола. При змінному струмі

втрати збільшуються через вплив поверхневого ефекту та ефекту близькості

$$R_{зм} = R k_{додат} \quad (1.34)$$

$$\text{де } k_{додат} = k_{поверх} - k_{близьк}$$

Поверхневий ефект виникає в результаті дії змінного струму, що створює вихрові струми в провіднику, які геометрично сумуються з основним змінним струмом. Як результат найбільша щільність струму спостерігається на поверхні провідника. Чим вище частота змінного струму та менший питомий опір провідника, тим сильніше проявляється поверхневий ефект. Суттєву роль також відіграє форма та розміри провідника – при збільшенні діаметра прояви поверхневого ефекту зростають. В провідниках із феромагнітних матеріалів вплив поверхневого ефекту різко зростає.

Ефект близькості виникає в результаті взаємодії магнітних полів розташованих поряд провідників. Наведені у провіднику вихрові струми геометрично сумуються з основним струмом, в результаті чого струм у перетині провідника розподіляється нерівномірно. Вплив ефекту близькості зростає із збільшенням частоти струму, електричної провідності матеріалу, зменшенням відстані між провідниками.

Втрати у неструмопровідних феромагнітних деталях машин та апаратів поділяються на втрати через гістерезис та вихрові струми, глибина проникнення яких визначається

$$a = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_a}}, \quad (1.35)$$

де ρ – питомий опір матеріалу;

f – частота магнітного потоку;

μ_a – абсолютна магнітна проникність.

Потужність втрат на одиницю площі поверхні можна визначити за співвідношенням

$$P = 2 \cdot 10^2 \sqrt{\rho f B \Phi_{нитом}^3}, \quad (1.36)$$

де $\Phi_{нитом}$ – магніторушійна сила на одиницю довжини.

Чим менші ρ, f та μ тим сильніше проявляється ефект витіснення потоку. Чим ближче провідники до масивної феромагнітної деталі, тим більший магнітний потік, що призводить до збільшення втрат.

Втрати на гістерезис визначаються

$$P = k_{\text{гисм}} B^{1,6} f G, \quad (1.37)$$

де G – маса магнітопроводу.

Втрати потужності у феромагнітних матеріалах загалом визначаються

$$P_{\text{фм}} = (k_{\text{гисм}} B^{1,6} + k_{\text{вихр}} f B^2) f G \quad (1.38)$$

При прикладенні до ізоляції напруги в ній відбуваються процеси поляризації і провідності, під дією яких виникають *діелектричні втрати*. Ці процеси визначають характеристики ізоляції і її стан.

Реальну ізоляцію можна представити схемою заміщення, представленою на рисунку 1.11.

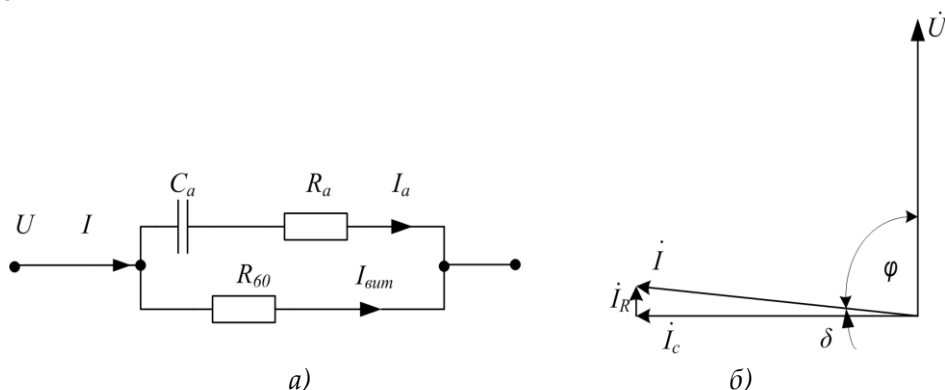


Рис. 1.11 – Схема заміщення ізоляції (а) і векторна діаграма напруги і струмів (б)

При прикладенні до ізоляції змінної напруги по ній протікає повний струм I , що складається з струму абсорбції I_a і струму витoku $I_{\text{в}}$. Повний струм відповідно з векторною діаграмою (рис. 1.11, б) можна розкласти на активну I_r і ємнісну I_c складові. Добуток UI_r визначає втрати активної потужності в ізоляції. Ці втрати призводять до нагріву ізоляції і називаються діелектричними втратами.

Втрати активної потужності у ізоляції згідно з векторною діаграмою визначаються як

$$P_i = UI_r = UI \cos \varphi = UI \cot \delta \quad (1.39)$$

Також до нагріву машини призводять: енергія, що виділяється в електричних дугах у комутаційних апаратах, особливо при частих включеннях, відключеннях, тертя між собою окремих елементів апаратів.

Нагрівання електричних апаратів та машин викликає прискорене старіння ізоляції і підвищує швидкість окислювання електричних контактів, що в результаті знижує термін служби електричного апарату.

Процес нагрівання та охолодження електричних машин та апаратів

Дослідження процесів нагрівання та охолодження електричних машин і апаратів є виключно складною задачею, оскільки деталі і вузли машини різної конфігурації, виготовлені із різних матеріалів, із різними значеннями теплоємності та теплопередачі. Неоднаковими є умови нагріву окремих частин машини, а напрямок теплових потоків залежить від режиму роботи даної машини. Наприклад, при холостому ході електродвигуна основна кількість теплоти виділяється у сталі статора, а при навантаженні – в обмотках ЕД.

При проектуванні і дослідженні теплових режимів електричних машин і апаратів їх часто розглядають у вигляді двоелементної моделі, одним з елементів якої є електрична обмотка, а другим – магнітопровід.

З метою спрощення дослідження процесів нагрівання та охолодження роблять припущення:

- електрична машина (ЕМ) розглядається як однорідне тіло із сталою теплоємністю, яке має нескінченно велику теплопровідність і однакову температуру у всіх точках у будь-який момент часу;
- тепловіддача в навколишнє середовище прямо пропорційна різниці температур машини і навколишнього середовища;
- теплоємність навколишнього середовища нескінченно велика, тобто під час нагрівання ЕМ її температура не змінюється;
- теплоємність, потужність теплових втрат і коефіцієнт тепловіддачі ЕМ не залежать від її температури.

Для визначення характеру процесу зміни температури ЕМ розглянемо баланс теплової енергії $\Delta P dt$, яка виділяється у ЕМ за елементарний проміжок часу dt . Одна частина цієї теплоти $A \tau dt$

віддається в навколишнє середовище, а друга частина $C d\tau$ витрачається на підвищення температури ЕМ. Таким чином, рівняння теплового балансу має вигляд

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau, \quad (1.40)$$

де ΔP – втрати потужності в ЕМ, $\frac{Дж}{с}$;

A – тепловіддача ЕМ, тобто кількість теплоти, що віддається в навколишнє середовище за $1с$ при різниці температур ЕМ і навколишнього середовища в 1°C , $\frac{Дж}{^\circ\text{C}}$;

τ – перевищення температури ЕМ над температурою охолоджуючого середовища, $^\circ\text{C}$;

C – теплоємність ЕМ, $\frac{Дж}{^\circ\text{C}}$;

$d\tau$ – приріст температури ЕМ за нескінченно малий проміжок часу, $^\circ\text{C}$.

Розділимо рівняння (1.38) на $A dt$, одержимо

$$\frac{\Delta P}{A} = \tau + \frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt} \quad (1.41)$$

Таким чином, теплові процеси в електричних машинах при прийнятих припущеннях описуються лінійним диференціальним рівнянням першого порядку.

Розв'яжемо рівняння (1.47) відносно dt

$$dt = \frac{\frac{C}{A} d\tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau} \quad (1.42)$$

Проінтегрувавши вираз (1.48), одержимо

$$t = -\frac{C}{A} \ln\left(\frac{\Delta P}{A} - \tau\right) + K. \quad (1.43)$$

Стала інтегрування K знайдеться з початкових умов, коли $t = 0$

$$K = \frac{C}{A} \ln\left(\frac{\Delta P}{A} - \tau_{\text{поч}}\right), \quad (1.44)$$

де $\tau_{поч}$ – початкове перевищення температури ЕМ над температурою охолоджуючого середовища, °С.

Підставивши значення K із виразу (1.44) у рівняння (1.43) знайдемо

$$t = -\frac{C}{A} \ln \frac{\frac{\Delta P}{A} - \tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau_{поч}}. \quad (1.45)$$

Пропотенціювавши, одержимо

$$e^{-\frac{t}{T_H}} = \frac{\frac{\Delta P}{A} - \tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau_{поч}}. \quad (1.46)$$

Розв'язавши вираз (1.43) відносно τ , одержимо рівняння нагрівання ЕМ

$$\tau = \frac{\Delta P}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{поч} e^{-\frac{t}{T_H}}, \quad (1.47)$$

де T_H – стала часу нагрівання ЕМ, с.

Згідно з прийнятими допущеннями теплоємність C і тепловіддача A електричних машин в процесі нагрівання залишаються незмінними. Отже, їх відношення є також незмінним, має розмірність часу і називається сталою часу нагрівання ЕМ

$$T_H = \frac{C}{A} \quad (1.48)$$

Стандартом визначено, що сталою часу нагрівання ЕМ називають час, протягом якого перевищення температури ЕМ, яка працює з постійним навантаженням і з віддачею теплоти в охолоджуюче середовище, змінюючись за експоненціальним законом, зростає від нуля до $0,632 \tau_y$

Фізичне значення сталої часу полягає в тому, що вона чисельно дорівнює умовному часу, за який ЕМ нагрілася б від $\tau_{поч} = 0$ до ustalеної температури τ_y при відсутності тепловіддачі в навколишнє середовище.

Аналізуючи рівняння (1.47), можна зробити висновок, що при сталих теплових втратах ΔP процес нагрівання ЕД описується експоненціальним законом. На початку процесу, коли $t = 0$, початкове

перевищення температури ЕМ було $\tau = \tau_{noch}$, а за нескінченно тривалий час $t = \infty$ настає теплова рівновага, тобто перевищення температури досягає деякого усталеного значення (рис. 1.12, а)

$$\tau_y = \frac{\Delta P}{A} \quad (1.49)$$

Після підстановки значення усталеної температури рівняння нагріву ЕМ записують так

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{noch} e^{-\frac{t}{T_H}} = (\tau_{noch} - \tau_y) e^{-\frac{t}{T_H}} + \tau_y. \quad (1.50)$$

Якщо на початку нагрівання ЕМ її температура дорівнює температурі охолоджуючого середовища ($\tau_{noch} = 0$), то рівняння (1.50) має вигляд

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) \quad (1.51)$$

За рівняннями (1.50 і 1.51) побудовані криві 2 і 4 нагріву ЕМ (рис. 1.12, а) відповідно для $\tau_{noch} = 0$ і $\tau_{noch} > 0$ при одному і тому ж навантаженні (однакових втратах потужності ΔP). Якщо навантаження ЕМ зменшити, в ній зменшаться і втрати потужності ($\Delta P > \Delta P_1$), що призведе до зниження усталеного перевищення температури ($\tau_{y1} < \tau_y$). Цьому випадку відповідає крива 1 за умови, що $\tau_{noch} = 0$. Крива 3 нагріву ЕМ побудована за даними, одержаними експериментально. Як видно з графіка, на початку процес нагрівання за даними експерименту інтенсивніший, ніж теоретично описаний експонентою. І тільки при $\tau > (0,5 - 0,6) \cdot \tau_y$ експериментальна крива наближається до теоретичної.

Відповідно і стала часу реального процесу нагрівання ЕМ не є сталою, а має найменше значення на початку процесу і найбільше – в кінці. Це пояснюється тим, що на відміну від прийнятої моделі на початку процесу завдяки тепловим опорам температура тепловіддаючих поверхонь ЕМ значно нижча, ніж температура гріючих поверхонь (мідь обмотки), а значить, і нижча її здатність віддавати тепло. Тому на підвищення температури витрачається більша частина енергії, ніж це передбачається теоретично.

Рівняння (1.50) можна використати і для опису процесу охолодження вимкненої ЕМ або при зменшенні її завантаження. Для

цього потрібно лише підставити в рівняння (1.50) відповідні значення $\tau_{поч}$ і τ_y . Якщо нагріта ЕМ вимкнена з мережі, то втрати потужності в ній дорівнюють нулю ($\Delta P = 0$) і згідно з виразом (1.49) $\tau_y = 0$. У цьому випадку процес охолодження характеризується кривою 1 (рис. 1.12, б). При зменшенні навантаження усталена температура $\tau_{y.o.}$ буде нижчою за початкову $\tau_{поч}$, і процес описується кривою 2.

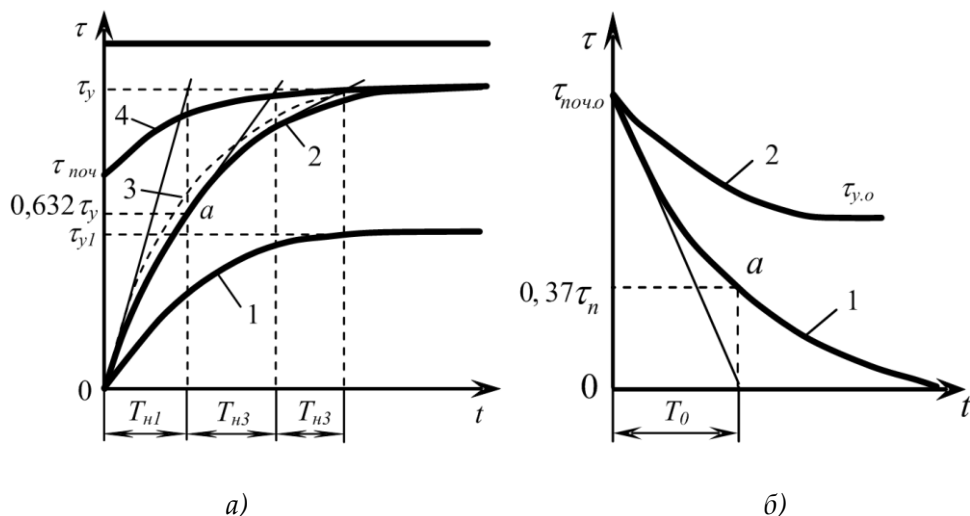


Рис. 1.12 – Криві нагріву (а) та охолодження (б) ЕМ

Згідно з рівняннями (1.50) час зміни температури від початкового до усталеного значення нескінченно великий. Практично ж теплова рівновага настає за час $t = (3-5)T_i$, тобто коли перевищення температури досягне $(0,95-0,99)\tau_y$. Для ЕМ малої потужності T_n становить десятки хвилин, для потужних ЕМ – 2-3 години.

Коли при охолодженні ЕМ умови тепловіддачі змінюються, то змінюється і стала часу.

Для обертальних електричних машин кількісне погіршення тепловіддачі характеризується коефіцієнтом погіршення тепловіддачі при нерухомій обертальній частині

$$\beta_o = \frac{A_o}{A}, \quad (1.52)$$

де A_o , A – тепловіддача відповідно при нерухомій обертальній частині ЕМ і при номінальній швидкості обертання. Коефіцієнт погіршення тепловіддачі у перехідних режимах роботи (пуск, гальмування) $\beta_{н.н.}$ визначається як

$$\beta_{н.н.} = \frac{1 + \beta_o}{2} \quad (1.53)$$

Електродвигуни різного виконання за способом охолодження мають приблизно такі значення коефіцієнта β_o :

- закритий з незалежною вентиляцією – 1,0;
- закритий без примусового охолодження – 0,95–0,98;
- закритий самовентильований – 0,45–0,55;
- захищений самовентильований – 0,25–0,35

Дійсно, при $A = 0$ рівняння (1.40) матиме вигляд

$$\Delta P dt = C d\tau \quad (1.54)$$

За умови, коли $t = 0$ і $\tau_{ноч} = 0$, після інтегрування лівої частини від 0 до τ_y одержимо

$$\Delta P t_y = C \tau_y, \text{ звідки } t_y = \frac{C \tau_y}{\Delta P} = \frac{C}{A} = T_n,$$

тобто час нагрівання ЕМ до усталеної температури чисельно дорівнює сталій часу нагрівання. З урахуванням (1.52) стала часу охолодження нерухомої ЕМ визначається

$$T_o = \frac{C}{A_o} = \frac{C}{A \beta_o} = \frac{T_n}{\beta_o} \quad (1.55)$$

Якщо $\beta_o \leq 1$, то $T_o \geq T_n$, тобто охолодження ЕМ при нерухомій обертальній частині відбувається повільніше, ніж її нагрівання.

Сталу часу нагрівання можна визначити різними методами. Розглянемо деякі з них.

Метод нормованого значення. Якщо в рівнянні (1.51) прийняти $t = T_n$, то можна одержати $\tau = \tau_y \left(1 - e^{\frac{-T_n}{T_H}} \right) = 0,632 \tau_y$.

Отже, якщо побудувати криву $\tau(t)$ і на осі τ (рис. 1.12, а) відкласти значення $0,632 \cdot \tau_y$, то цьому значенню перевищення

температури ЕМ відповідає час від початку вмикання $t = 0$ до $t = T_n$, який знаходять на осі t .

Метод дотичної. Сталу часу нагрівання можна визначити графічно (рис. 1.12 а). Для цього потрібно провести дотичну до кривої нагріву (краще у другій половині кривої). Відрізок, взятий між точкою перетину дотичної з лінією усталеного перевищення температури τ_y і вертикаллю, поставленою з точки дотику, дорівнює в масштабі часу t сталій часу T_n .

Для більшої точності визначення T_n проводять три дотичних до точок (у другій її половині) і знаходять середнє значення визначених сталих часу. Сталу часу охолодження визначають відрізком осі абсцис (рис. 1.12, б), відтягив дотичною до будь-якої точки кривої охолодження і перпендикуляром, опущеним з цієї точки на вісь абсцис. При зменшенні навантаження усталена температура $\tau_{y,0}$ буде нижчою за початкову $\tau_{нач,0}$, а процес описується кривою 2 (рис 1.12, б).

Аналітичний метод. Сталу часу нагріву ЕМ можна наближено визначити за формулою

$$T_n = \frac{C}{A} = \frac{c_1 m}{A} = \frac{c_1 m \tau_{доп} \eta_{ном}}{P_{ном} 10^3 (1 - \eta_{ном})}, \quad (1.56)$$

де c_1 – питома теплоємність матеріалів ЕМ, $\frac{Дж}{^{\circ}C \cdot кг}$;

$\tau_{доп}$ – допустиме перевищення температури ЕМ над температурою охолоджуючого середовища, $^{\circ}C$;

$P_{ном}$ – номінальна потужність ЕМ, кВт;

$\eta_{ном}$ – номінальне значення коефіцієнта корисної дії;

A – тепловіддача ЕМ, $\frac{Дж}{с \cdot ^{\circ}C}$, яка дорівнює

$$A = \frac{\Delta P_{ном}}{\tau_{доп}} = \frac{P_{ном} \cdot (1 - \eta_{ном})}{\tau_{доп} \cdot \eta_{ном}} \quad (1.57)$$

Усталене значення перевищення температури ЕМ для кожного i -того значення навантаження визначається

$$\tau_{y,i} = \frac{\Delta P_i}{A}. \quad (1.58)$$

При сталій швидкості обертання обертальної частини машини значення A і T_n незмінні. Таким чином, підставляючи в рівняння нагріву відповідні втрати потужності, одержимо дані, за якими буде побудовано сімейство кривих нагріву (рис. 1.13), які відрізняються одна від одної лише величиною усталеного перевищення температури ЕМ.

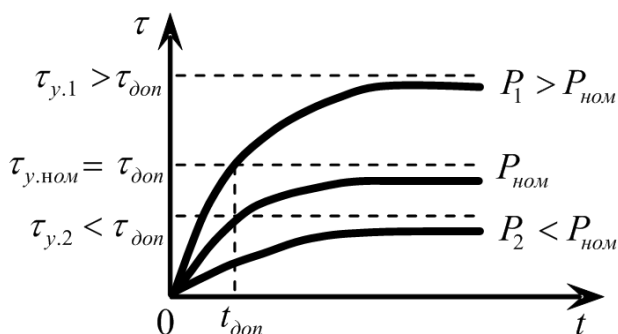


Рис. 1.13 – Криві нагріву ЕМ при різних навантаженнях

Аналізуючи криві (рис. 1.13), приходимо до висновку, що при $\Delta P_2 < \Delta P_{ном}$ перевищення температури ЕМ не досягає номінального (допустимого) значення. При $\Delta P_2 > \Delta P_{ном}$ перевищення температури ЕМ буде більшим за номінальне, що свідчить про перевантаження ЕМ. В цьому режимі допустима тривалість роботи ЕМ визначається часом нагріву її обмоток до допустимої температури даного класу ізоляції.

Оскільки теплове перевантаження ЕМ обмежується теплостійкістю її ізоляції, то, користуючись кривими нагріву, практично можна визначити потужність, з якою працює машина.

Способи передачі тепла всередині нагрітих тіл та з їхньої поверхні

Розрізняють три види теплообміну: *теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.*

Теплопровідністю називається процес поширення тепла між частинками, які безпосередньо торкаються одна одної, обумовлений тепловим рухом молекул чи атомів речовини, а в металах – вільних електронів. Математично цей процес описується рівнянням Фур'є

$$d^2Q = -\lambda \frac{d\theta}{dx} dS dt, \quad (1.59)$$

де d^2Q – кількість тепла, переданого в напрямку x за рахунок теплопровідності, Дж ;

λ – питома теплопровідність матеріалу, через який йде передача тепла; кДж/(кг °С);

θ – температура; °С

d – поверхня, через яку протікає тепло; м

dt – час, протягом якого протікає тепло d^2Q , с.

Величина $\frac{d\theta}{dx}$ називається градієнтом температури і характеризує швидкість зміни температури в напрямку x , перпендикулярному до площадки d . З цього рівняння випливає

$$\lambda = \frac{d^2Q}{-\frac{d\theta}{dx}dSdt} \quad (1.60)$$

Таким чином, *питома теплопровідність* λ – це кількість тепла, що проходить через одиницю поверхні за 1 с при градієнті температури 1 °С·м⁻¹.

Від'ємний знак правої частини зумовлений тим, що теплова енергія поширюється від точок з більшою температурою до точок з меншою температурою, тобто в напрямку, протилежному градієнту температури.

Температурне поле може бути тривимірним. Тому, розглядаючи тепло, передане в напрямку x , ми беремо частинну похідну від температури по координаті x .

Як приклад застосуємо рівняння для знаходження питомої теплопровідності λ для знаходження розподілу температур у стінці, що розділяє два середовища, які мають різні температури θ_1 і θ_2 (рис. 1.14).

Перетворюючи рівняння (1.60), матимемо

$$\frac{d^2Q}{dSdt} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} = \Phi_0, \quad (1.61)$$

де Φ_0 – кількість тепла, що проходить через поверхню в 1 м² за 1 с, і називається щільністю теплового потоку.

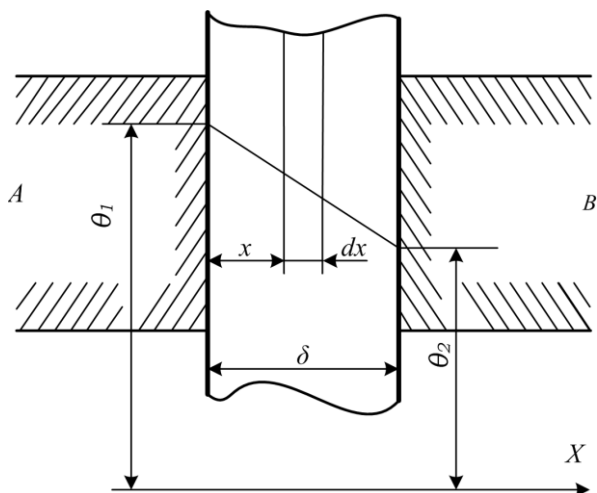


Рис. 1.14 – До розрахунку перепаду температури в плоскій стінці

Для сталого режиму роботи величина Φ_0 постійна

$$\Phi_0 = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (1.62)$$

Провівши інтегрування, отримаємо

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} -d\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{\Phi_0 x}{\lambda} \int_0^{\delta} = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda} \quad (1.63)$$

Таким чином, спад температури вздовж координати x відбувається за лінійним законом.

Іноді для зручності розрахунків вводиться поняття теплового опору R_T . Потік, що проходить за 1 с через усю поверхню, дорівнює

$$\Phi = \Phi_0 S \quad (1.64)$$

Скориставшись двома останніми формулами, отримаємо

$$\Delta\theta = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda} = \frac{\Phi \delta}{\lambda S} = \Phi R_T, \quad (1.65)$$

де R_T – тепловий опір стінки.

Останнє рівняння аналогічне рівнянню (закону) Ома для електричного ланцюга і називається тепловим законом Ома: падіння температурного потенціалу дорівнює добутку потоку на тепловий опір. Тепловий опір пропорційний довжині шляху потоку δ і

обернено пропорційний перерізу і питомій теплопровідності. З цього рівняння можна отримати

$$\Phi = \Delta\theta / R_r \quad (1.66)$$

Кількість тепла Φ , що відводиться за 1 секунду від тіла за рахунок теплопровідності, прямо пропорційна перепаду температури $\Delta\theta$ і обернено пропорційна тепловому опору R_r того тіла, через яке передається тепло.

Якщо тепловий потік проходить через ряд стінок з товщиною δ_i теплопровідністю λ_i , то тепловий опір дорівнює

$$R_r = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{1}{S} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right) \quad (1.67)$$

Дані про питому теплопровідність матеріалів є довідниковими даними.

Конвекція — це перенос тепла, пов'язаний з переміщенням мікрооб'ємів нагрітого газу або рідини. При природній конвекції рух газу, що охолоджує, або рідини відбувається за рахунок різниці густини нагрітих і холодних об'ємів газу чи рідини.

При штучній конвекції рух середовища, що охолоджує, виконується за допомогою вентиляторів або насосів. Кількість тепла, що віддається тілом за рахунок конвекції, визначається у найпростішому випадку з рівняння

$$\Phi_k = \alpha_k (\theta_2 - \theta_1) S, \quad (1.68)$$

де Φ_k – тепло, що віддається за 1с з поверхні площею S , Вт;

α_k – коефіцієнт теплопередачі при конвекції – тепло, що знімається за 1 с з поверхні площею 1 м² при різниці температур поверхні і середовища, що охолоджує, в 1°С, Вт/(м²·°С);

θ_2 – температура нагрітої поверхні, °С ;

θ_1 – температура середовища, що охолоджує, °С;

S – площа охолоджуваної поверхні, м².

Коефіцієнт тепловіддачі α_k є складною функцією багатьох факторів, зокрема температури, в'язкості, щільності охолоджуючого середовища, виду охолоджуваної поверхні і її розташування відносно потоку охолодження середовища і поля тяжіння, швидкості вимушеного руху середовища.

У більшості випадків коефіцієнт α_k визначають за емпіричними формулами.

Кількість тепла, що відводиться за рахунок конвекції, як і коефіцієнт α_k нелінійно залежить від перепаду температур.

Коефіцієнт тепловіддачі α_k є довідниковими даними, більш точно цей коефіцієнт можна розрахувати за допомогою теорії подібності.

У зв'язку з тенденцією збільшення номінального (тривалого) струму апаратів дуже перспективним є застосування *штучної конвекції*. Це дозволяє знизити розміри апаратів, полегшити контакти, збільшити швидкодію і зменшити витрати цінних металів. Прикладом є комп'ютер.

Випромінювання. Частину тепла нагріте тіло віддає в навколишній простір шляхом випромінювання електромагнітних коливань (ультрафіолетових, світлових і інфрачервоних променів). Цей спосіб тепловіддачі називається випромінюванням, або радіацією. Тепло, втрачене тілом за рахунок випромінювання, може бути визначене за допомогою рівняння Стефана–Больцмана

$$\Phi_{\text{л}} = c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{1000} \right)^4 \right] S, \quad (1.69)$$

де $\Phi_{\text{л}}$ – тепло (Вт), що віддається за 1 с із поверхні площею S (м²) при температурі тіла T_2 (К) і температурі навколишнього середовища T_1 (К);

c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε – ступінь чорності випромінюючого тіла.

Значення c_0 приймають рівним $5,7 \cdot 10^4$ Вт·м⁻²·К⁻⁴, значення ε є довідковими.

Таким чином, тепло, що віддається тілом при випромінюванні, залежить від різниці значень абсолютних температур нагрітої поверхні і навколишнього середовища, взятих у четвертому степені.

З рівнянь випливає, що сумарна кількість тепла, що віддається тілом усіма видами тепловіддачі, нелінійно залежить від температури, що значно ускладнює розрахунок. Тому в кожному конкретному випадку необхідно зробити оцінку всіх видів тепловіддачі і розрахунок вести за тим з них, що має основне значення.

Способи охолодження електричних машин і апаратів

За способом охолодження електричні машини поділяють на машини з *природним* охолодженням та машини зі *штучним* охолодженням.

Машини з природним охолодженням не мають вентиляторів чи будь-яких інших пристроїв, що покращують умови їх охолодження. Охолодження в таких машинах відбувається природним шляхом за рахунок теплопровідності та конвекції. Природне охолодження застосовують у потужних відкритих машинах або в закритих машинах малої потужності.

Машини зі штучним охолодженням мають спеціальний пристрій, як правило, вентилятор, що створює рух газу в машині, який охолоджує нагріті частини машини. Більшість машин зі штучним охолодженням мають самовентиляцію, коли вентилятор закріплений на валу машини і створює аеродинамічний напір, яким охолоджуюче повітря “перекачується” через машину. Самовентиляція буває зовнішньою і внутрішньою.

При зовнішній самовентиляції вентилятором обдувається зовнішня поверхня машини, а сам вентилятор закривається спеціальним кожухом.

При внутрішній самовентиляції в конструктивних елементах машини виготовляються спеціальні канали, через які вентилятором, розташованим всередині машини, “перекачується” повітря. Нагріте повітря витісняється з машини через спеціальні отвори (в ЕД отвори зроблені в підшипникових щитах).

Великі електричні машини мають замкнену систему вентиляції з використанням водню (водневе охолодження) в якості охолоджувального газу. Таке охолодження, не дивлячись на складність конструкції та експлуатації, має низку переваг:

- технічний водень більш ніж у десять разів легший від повітря, а це знижує втрати на вентиляцію, а отже, підвищує ККД машини;
- підвищена теплопровідність водню, що в 6–7 разів більша, ніж у повітря, дозволяє більш інтенсивно охолоджувати машину, це дає змогу знизити габарити машини, у порівнянні з повітряним охолодженням, приблизно на 20–25 %;
- водневе охолодження знижує небезпеку виникнення пожежі в машині, тому що водень не підтримує горіння;

- водневе охолодження подовжує строк служби ізоляції, тому що відсутність азоту в машині не дозволяє виникати сполукам, які руйнують органічні компоненти ізоляційних матеріалів.

Відсутність у деяких ЕМ, зокрема у трансформаторів, обертових частин значно погіршує їх охолодження порівняно з машинами, що мають обертові частини. Найбільшого поширення тут отримали наступні способи охолодження:

- природне повітряне охолодження, коли всі частини, що нагріваються, безпосередньо омиваються навколишнім повітрям, а охолодження відбувається за рахунок випромінювання теплоти та природної конвекції повітря;

- природне масляне охолодження, при якому активна частина трансформатора розташовується у наповненому трансформаторним маслом баці. Трансформаторне масло шляхом конвекції передає тепло стінкам бака (трубам навісних радіаторів), а останні передають цю теплоту в навколишнє середовище;

- масляне охолодження з дуттям, коли трансформатори обладнуються радіаторами, що обдуваються вентиляторами і такий вид охолодження дозволяє підвищити одиничну потужність трансформатора на 40–50 %, застосовується у трансформаторах потужністю більше 10000 кВ·А;

- масляне охолодження з дуттям і вимушеною циркуляцією масла дозволяє поліпшити охолодження, в порівнянні з попереднім способом, за рахунок установки насоса, яким створюється вимушена циркуляція масла в радіаторах, що обдуваються вентиляторами;

- масляно-водяне охолодження є найбільш ефективним. Масло перекачується насосом у охолоджувач, що омивається водою, а коефіцієнт теплопередачі води значно вищий, ніж у повітря.

Застосування вище наведених способів охолодження дозволило створити трансформатори зі значними одиничними потужностями. Так, у ВАТ “Запоріжтрансформатор” створені і виготовляються силові трансформатори потужністю понад 1 млн кВ·А.

1.5 РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Режими роботи електричних машин

Номінальним режимом роботи електричної машини називають режим роботи, для якого машина виготовлена підприємством – виробником і який наведено у її паспорті. Сучасними стандартами передбачено вісім номінальних режимів роботи електричних машин з умовним позначенням від S1 до S8.

Тривалий номінальний режим (S1) – *режим роботи при незмінному номінальному навантаженні* (рис. 1.15, а), який триває такий час ($t_p \geq 3T_n$), за який перевищення температури всіх частин машини, при незмінній температурі навколишнього середовища досягає установленого значення $\tau_{уст}$. Прикладами механізмів з таким технологічним режимом можуть бути відцентровий насос з сталими значеннями висоти всмоктування, тиску в напірному трубопроводі і продуктивності, компресорні і вентиляторні установки, конвеєри з сталою масою транспортованого матеріалу, зерноочисні машини, силосорізки, металорізальні верстати, установки безперервного транспорту.

Короткочасний номінальний режим роботи (S2) – режим, при якому періоди незмінного номінального навантаження машини чергуються з періодами відключення її з електромережі, причому тривалість періоду роботи ($t_p \ll 3T_n, \gg t_0 3T_n$) настільки мала, що машина не встигає нагрітися до усталеної температури $\tau_{уст}$, а за період паузи охолоджується до температури охолоджуючого середовища (рис. 1.15, б). Режим S2 характеризується тривалістю робочого періоду. Стандартна тривалість робочого періоду t_p : 10, 30, 60, 90 хв. Але умови виробництва вимагають широкої номенклатури, тому налагоджено випуск електричних машин і з іншою тривалістю роботи, наприклад, 1; 2,5; 5; 8; 13; 18 хв та ін. У короткочасному режимі працюють ЕД приводів конвеєрів для роздавання кормів, прибирання гною, повороту лотків в інкубаторі та ін. Якщо тривалість роботи машини перевищує 90 хв, то режим роботи вважають тривалим.

Повторно-короткочасний номінальний режим (S3) – *це послідовність однакових робочих циклів, кожен з яких складається з періодів роботи з номінальним навантаженням і вимкненого*

нерухомого стану, причому тривалість періоду роботи $t_p \ll 3T_n$ і пауз $t_0 \ll 3T_n$ настільки мала, що за час роботи ЕД не встигає нагрітися до практично усталеної температури, а за час паузи не встигає охолонути до температури охолоджуючого середовища (рис.1.15, в). Тривалість одного робочого циклу $t_{ц} = t_p + t_0$ приймають не більше 10 хв. Режим характеризується тривалістю вмикання (ТВ%), яка визначається за формулою

$$TB\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100\% = \frac{t_p}{t_{ц}} 100\% \quad (1.70)$$

Стандартні значення ТВ%, на які розраховуються і випускаються електричні машини наступні: 15, 25, 40 і 60 %. Якщо $TB\% > 60\%$ або $t_{ц} > 10$ хв, то режим роботи вважають тривалим із змінним навантаженням.

У повторно-короткочасному режимі працюють ЕД приводів деяких безбаштових насосних установок для води, кранів, підйомників тощо.

Повторно-короткочасний номінальний режим із частими пусками (S4) – це послідовність однакових робочих циклів, кожен з яких складається з періодів пуску, роботи з постійним навантаженням і періоду вимкненого стану. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 1.15, г). Режим характеризується тривалістю вмикання ТВ, кількістю пусків за годину і коефіцієнтом інерції електроприводу. Нормовані значення коефіцієнта інерції F_I 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10. Тривалість вмикання ЕД визначається за формулою

$$TB\% = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_0} 100\% , \quad (1.71)$$

де t_n – тривалість пуску.

Нормовані значення ТВ%: 15; 25; 40 і 60 %. Нормоване число пусків за годину: 30; 60; 120 і 240.

Повторно-короткочасний номінальний режим із частими пусками і електричним гальмуванням (S5) – це послідовність однакових робочих циклів, кожен з яких складається з періоду пуску, періоду роботи з постійним навантаженням, періоду швидкого електричного гальмування і періоду вимкненого стану. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 1.15, д). У цьому режимі втрати

потужності при пуску і електричному гальмуванні суттєво впливають на перевищення температури двигуна. Режим характеризується такими ж номінальними даними, як і режим S4.

Нормовані значення коефіцієнта інерції в режимі S5: 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4. Тривалість вмикання визначається за формулою

$$TB\% = \frac{t_n + t_p + t_z}{t_n + t_p + t_z + t_0} 100\%, \quad (1.72)$$

де t_z – тривалість електричного гальмування.

Номінальний переміжний режим (S6) – *це послідовність однакових робочих циклів, кожен з яких складається з періоду роботи з постійним навантаженням і періоду холостого ходу*. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 1.15, е). Цей режим характеризується тривалістю навантаження TH%, яка визначається за формулою

$$TH\% = \frac{t_p}{t_p + t_{x.x}} 100\%, \quad (1.73)$$

де $t_{x.x}$ – тривалість періоду холостого ходу.

У цьому режимі тривалість циклу не перевищує 10 хв. Стандартні тривалості навантаження TH: 15; 25; 40 і 60 % вказують після умовного позначення режиму. Наприклад: S6 40%. У цьому режимі працюють двигуни пилорами, циркулярки та ін.

Номінальний переміжний режим з частими реверсами (S7) – *це послідовність однакових робочих циклів, кожен з яких складається з періоду пуску, періоду роботи з постійним навантаженням, періоду електричного гальмування*. Період вимкненого стану відсутній. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 1.15, є). Нормується кількість реверсів за годину (30; 60; 120; 240) і коефіцієнт інерції (1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10).

Номінальний переміжний режим з двома або більше ступенями частот обертання (S8) – *це послідовність однакових робочих циклів, кожен з яких складається з періоду прискорення, періоду роботи з постійним навантаженням і заданою частотою обертання та одним або декількома періодами роботи з іншим постійним навантаженням з іншими частотами обертання*. Період вимкненого стану відсутній.

Тривалість кожного робочого періоду недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу. У цьому режимі втрати потужності при переході з однієї частоти обертання на іншу суттєво впливають на перевищення температури електричної машини.

Для типового режиму S8 після скороченого позначення вказують коефіцієнт інерції F_I , число циклів за годину, а також навантаження, частоту обертання і тривалість вмикання на кожній ступені частоти обертання.

Тривалість вмикання на окремих ступенях визначається за формулами

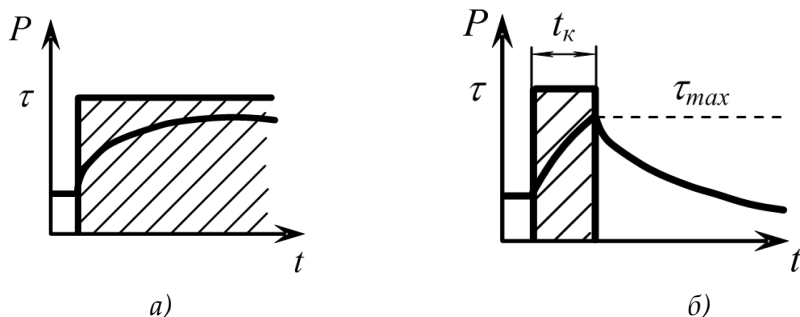
$$TB\%_1 = \frac{t_n + t_{p1}}{t_n + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\% \quad (1.74)$$

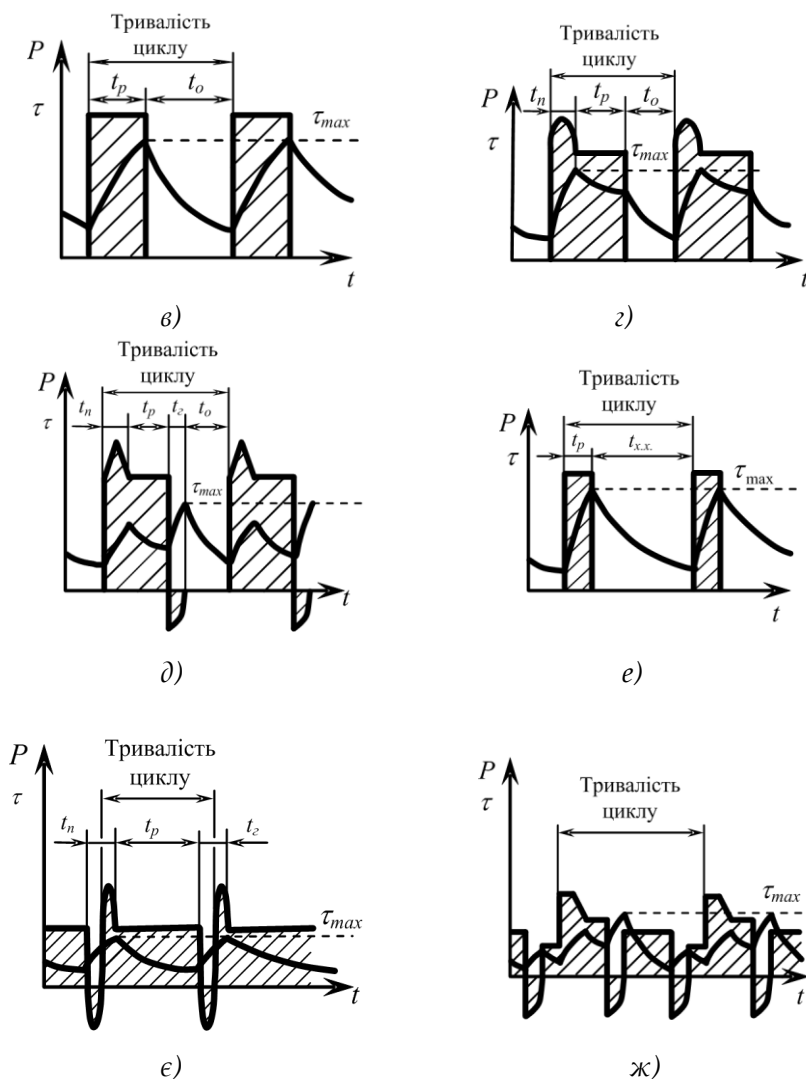
$$TB\%_2 = \frac{t_{e1} + t_{p2}}{t_n + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\% \quad (1.75)$$

$$TB\%_3 = \frac{t_{e2} + t_{p3}}{t_n + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\%, \quad (1.76)$$

де t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} — тривалість навантаження на кожному ступені обертання;

t_{e1}, t_{e2} — тривалість електричного гальмування при переході з однієї частоти обертання на іншу.





а) – у тривалому режимі роботи (S1); б) – у короткочасному режимі роботи (S2); в) – у повторно-короткочасному режимі роботи (S3); г) – у повторно-короткочасному режимі роботи з частими пусками (S4); д) – у повторно-короткочасному режимі з частими пусками і електричним гальмуванням (S5); е) – у переміжному режимі (S6); є) – у переміжному режимі з частими реверсами (S7), ж) – у переміжному режимі з двома або більше ступенями частот обертання (S8)

Рис. 1.15 – Залежність потужності на валу двигуна P та температури τ від часу

Режими роботи електричних апаратів

При експлуатації електричних апаратів мають місце наступні режими роботи:

Тривалий – при якому температура апарата досягає сталого значення і апарат при цій температурі залишається під навантаженням достатньо тривалий час;

Переривисто-тривалий – режим роботи, при якому апарат залишається під навантаженням при сталому значенні температури обмежений технічними умовами час;

Короткочасний – режим роботи, при якому період навантаження змінюється паузою, час якої достатній для досягнення апаратом температури холодного стану.

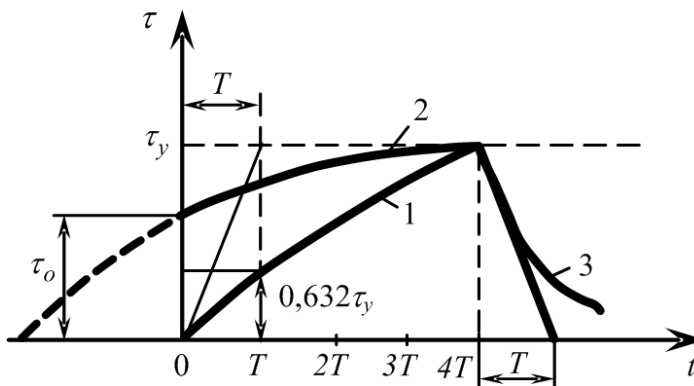


Рис. 1.16 – Залежність температури нагріву τ у часі при тривалому режимі роботи електричних апаратів

Короткочасний режим роботи характеризується коефіцієнтом перевантаження апарата за потужністю

$$K_{пер} = \frac{P_{коротк}}{P_{трив}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} \quad , \quad (1.77)$$

де $P_{коротк}$ – потужність теплових втрат в апараті при короткочасному режимі роботи.

$P_{трив}$ – потужність теплових втрат в апараті при тривалому режимі роботи.

Коефіцієнт показує у скільки раз апарат можна перевантажити у короткочасному режимі порівняно із тривалим.

Коефіцієнт перевантаження по струму

$$K_{Inne} = \sqrt{K_{Pnep}} \quad (1.78)$$

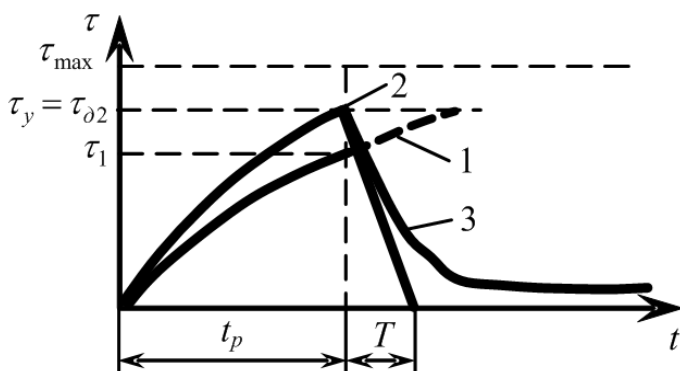


Рис. 1.17 – Залежність температури нагріву τ у часі при короткочасному режимі роботи електричних апаратів

Повторно-короткочасний – при якому температура частин електричного апарата за час навантаження не досягає сталого значення, а за час паузи не досягає температури холодного стану

Режим характеризується тривалістю вмикання ТВ, коефіцієнтом перевантаження за потужністю.

Тривалість вмикання апарата визначається за формулою

$$TB\% = \frac{t_p}{t_n + t_p} 100\%, \quad (1.79)$$

де t_n – тривалість паузи;

t_p – тривалість роботи.

Коефіцієнт перевантаження за потужністю

$$K_{Pnep} = \frac{P_{повт.коротк}}{P_{трив}} = \frac{1 - e^{\frac{-t_y}{T}}}{1 - e^{\frac{-t_p}{T}}}, \quad (1.80)$$

де $P_{повт.коротк}$ – потужність теплових втрат в апараті при повторно-короткочасному режимі роботи.

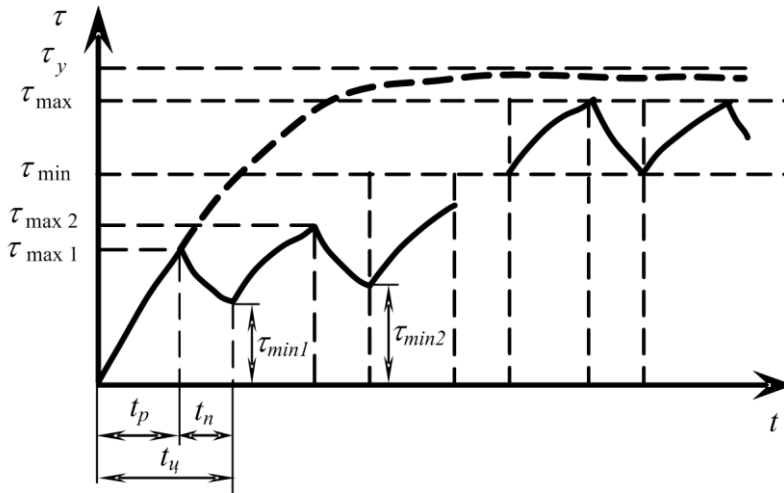


Рис. 1.18 – Залежність температури нагріву τ у часі при повторно-короткочасному режимі роботи електричних апаратів

Протягом першого циклу за час t_{p1} апарат нагрівається до деякого перевищення температури τ_{ycm1} , а за час першої паузи t_{n1} відбувається його охолодження до τ_{min1} . У другому робочому циклі нагрів апарата почнеться при $\tau_{noch1} = \tau_{min1}$ і за час t_{p2} буде досягнута температура τ_{max2} . Оскільки $t_{p1} = t_{p2}$ і $\tau_{noch2} > \tau_{noch1}$, то $\tau_{max2} > \tau_{max1}$. За час другої паузи t_{n2} апарат охолоне і наприкінці другого циклу буде досягнуто температури τ_{min2} , яка вище за τ_{min1} . Якщо такі цикли будуть періодично повторюватись достатньо довго, то установиться процес коливання температури апарата, так званий квазіусталений режим.

Короткого замикання – окремий випадок короткочасного режиму роботи, коли температура частин електричного апарата значно перевищує сталу температуру при нормальному режимі роботи

1.6 СТАНДАРТИЗАЦІЯ

Широке застосування, а також розвиток міжнародної торгівлі привели до необхідності стандартизації національних та міжнародних електричних машин.

Стандартизація електричних двигунів

Міжнародна стандартизація асинхронних двигунів здійснюється міжнародною електротехнічною комісією – МЕК (International Electrotechnical Commission – IEC) [5 IEC 60034-14].

Стандартизація охоплює практично всі характеристики двигунів:

- 1 номінальна потужність;
- 2 синхронна частота обертання;
- 3 настановно-приєднувальні розміри;
- 4 ступінь захисту;
- 5 способи охолодження;
- 6 монтажних виконань;
- 7 енергетичні характеристики;
- 8 механічні характеристики і пускові властивості;
- 9 віброшумові характеристики;
- 10 сервіс-чинник;
- 11 напруга і частота;
- 12 умови експлуатації: температура навколишнього середовища, висота над рівнем моря, механічні дії;
- 13 режими роботи.

1 Номінальні потужності

Номінальною потужністю електродвигуна називають механічну потужність на валу в режимі роботи, для якого він призначений підприємством-розробником. Номінальні потужності електричних машин повинні відповідати їх роботі при номінальних значеннях напруги, частоти змінного струму, коефіцієнта потужності, а також умовам і режимам роботи, що встановлені в стандартах або галузевих нормативно-технічних документах.

Основний ряд номінальних потужностей електричних машин згідно з державними стандартами [6] – 0,06; 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400 кВт.

2 Синхронна частота обертання

Ряд синхронних частот обертання асинхронних двигунів встановлений ГОСТ 10683-73 і при частоті мережі 50 Гц має наступні значення: 500, 600, 750, 1000, 1500, 3000 обертів за хвилину. Синхронна частота обертання пов'язана з числом пар полюсів і частотою струму в мережі.

3 Установлювальні розміри

Кріплення електродвигунів на об'єкті зазвичай проводиться за допомогою лап, фланців або лап і фланців одночасно. Настановні розміри для електродвигунів позначаються за ГОСТ 4541 (Публікація МЕК 60072). Всі установлювальні розміри указуються в каталогах.

Ув'язка стандартизованих рядів потужності і установлювальних розмірів проводиться таким чином, що кожному значенню номінальної потужності залежно від синхронної частоти обертання або числа полюсів відповідає певна висота осі обертання і умовна довжина станини (S, M або L), тобто певні встановлювальні розміри. Висота осі обертання регламентована за наступними розмірами – 50; 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 132; 160; 180; 200; 225; 250; 280; 315; 355 мм.

Ув'язка рядів потужностей і настановних розмірів регламентується ГОСТ 51689-2000 у двох варіантах:

I – варіант, прийнятий на території Російської Федерації і деяких країн СНД.

II – варіант, прийнятий в країнах Європейського Союзу, відповідний нормам Європейського комітету з координації електротехнічних стандартів (CENELEC).

4 Ступінь захисту

Ступінь захисту для електричних машин встановлений в ГОСТ 17494-87. Ступінь захисту позначається двома латинськими буквами IP (International Protection) і двома цифрами. Перша цифра визначає ступінь захисту персоналу від зіткнення з рухомими або струмопровідними частинами, а також ступінь захисту від потрапляння всередину машини твердих сторонніх тіл. Друга цифра позначає ступінь захисту від проникнення води всередину машини.

Сучасні стандартні асинхронні двигуни загальнопромислового призначення мають ступінь захисту IP54, ступінь захисту струмовиводів IP55, клас ізоляції F.

5 Способи охолодження

Позначення способів охолодження вказуються за допомогою двох латинських букв IC (International Cooling) і характеристики ланцюга охолодження. Кожен ланцюг охолодження машини має характеристику, що позначається латинською буквою, яка вказує вид холодоагента, і двома цифрами. Перша цифра позначає влаштування ланцюга для циркуляції холодоагента, друга – спосіб підводу енергії для циркуляції холодоагента. Якщо машина має два або більше ланцюги охолодження, то в позначенні вказуються характеристики всіх ланцюгів охолодження. Якщо повітря є єдиним холодоагентом машини, то дозволяється виключати букву, яка позначає природу газу.

Для стандартних асинхронних двигунів застосовуються наступні способи охолодження:

IC01 – двигуни із ступенями захисту IP20, IP22, IP23 з вентилятором, розташованим на валу двигуна;

IC05 – двигуни із ступенями захисту IP20, IP22, IP23 з прибудованим вентилятором, що має незалежний привод;

IC0141 – двигуни із ступенями захисту IP43, IP44, IP54, IP55 із зовнішнім вентилятором, розташованим на валу двигуна;

IC0541 – двигуни із ступенями захисту IP43, IP44, IP54, IP55 з прибудованим вентилятором, що має незалежний привод.

6 Виконання за способом монтажу

Конструктивні виконання за способом монтажу IM (International Mounting) для двигунів з прив'язкою потужності до настановно-приєднувальних розмірів за стандартом PC3031-71, B з прив'язкою розмірів за європейськими стандартами CENELEK встановлюються наступні умовні позначення.

Позначення конструктивного виконання (перша цифра):

1 – на лапах з підшипниковими щитами;

2 – на лапах з підшипниковими щитами і з фланцем на підшипниковому щиті (або щитах);

3 – без лап з підшипниковими щитами і фланцем на одному підшипниковому щиті;

4 – без лап з підшипниковими щитами, з фланцем на станині;

5 – без підшипникових щитів.

Цифри 6–9 в асинхронних двигунах загального призначення не застосовуються.

Позначення способу монтажу (друга і третя цифри): просторове положення машини і напрям кінця валу, причому в позначенні напрямку кінця валу (3-я цифра) цифра 8 означає, що машина може працювати при будь-якому з напрямів кінця валу;

Позначення кінця валу (четверта цифра):

0 – без кінця валу;

1 – з одним циліндровим кінцем валу;

2 – з двома циліндровими кінцями валу;

3 – з одним конічним кінців валу;

4 – з двома конічними кінцями валу.

Цифри 5–9 в асинхронних двигунах загального призначення не застосовуються.

7 Енергетичні характеристики

Основними енергетичними характеристиками двигунів є показники енергоефективності і ковзання.

Показниками енергоефективності є:

- коефіцієнт корисної дії (ККД) – це відношення корисної потужності на валу двигуна, вираженої в кіловатах, до активної потужності, споживаної двигуном з мережі, вираженої в кіловатах;

- коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) – це відношення споживаної активної потужності, вираженої в кіловатах (кВт), до повної потужності, споживаної з мережі, вираженої в кіловольтамперах (кВ·А).

Відповідно до ГОСТ 28330-89 (ГОСТ Р. 51677-2000) залежно від вимог до рівня енергоефективності, асинхронні двигуни загально-промислового призначення підрозділяються на двигуни з нормальним ККД і двигуни з підвищеним ККД (енергозберігаючі двигуни). При цьому двигуни з підвищеним ККД мають сумарні втрати не менше ніж на 20 % нижче, ніж двигуни з нормальним ККД тієї ж потужності і частоти обертання. Конкретні значення ККД і $\cos \varphi$ кожного двигуна указуються в каталогах.

Ковзання характеризує різницю між номінальною і синхронною частотою обертання двигуна.

У каталогах наводяться значення номінальної частоти обертання ротора (n_1 , об/хв) або ковзання (S , %).

8 Механічні характеристики і пускові властивості двигуна

Механічна характеристика – це залежність обертового моменту двигуна від його частоти обертання при незмінній напрузі і частоті мережі живлення.

Пускові властивості характеризуються значеннями пускового моменту M_n , мінімального моменту M_{min} , максимального (критичного) моменту $M_{кр}$, пускового струму I_n чи пускової потужності S_n або їх кратностям.

Залежність моменту, віднесеного до номінального моменту, від ковзання називається відносною механічною характеристикою.

Пускові властивості асинхронних електродвигунів:

M_n/M_n – кратність пускового моменту до номінального;

$M_{кр}/M_n$ – кратність максимального моменту до номінального;

M_{min}/M_n – кратність мінімального моменту до номінального;

I_n/I_n – кратність пускового струму до номінального;

S_i – кратність пускової потужності до номінальної.

Конкретні значення пускових властивостей двигунів наводяться в каталогах.

Двигуни з короткозамкненим ротором простіші і надійніші в експлуатації, значно дешевіші, ніж двигуни з фазним ротором. Проте двигуни з фазним ротором володіють кращими пусковими і регульовальними властивостями. В даний час асинхронні двигуни виконують переважно з короткозамкненим ротором і лише при великих потужностях і в спеціальних випадках використовують фазну обмотку ротора.

9 Віброшумові характеристики

Граничні значення рівнів шуму електричних машин визначені ГОСТ 16372-93. Інтенсивність власної вібрації асинхронних двигунів відповідно до ГОСТ 20815 характеризується середньоквадратичним значенням вібраційної швидкості. Конкретні значення рівнів звуку, звукової потужності і вібраційної швидкості залежно від габариту і частоти обертання (числа полюсів) двигуна наводяться в каталогах.

10 Сервіс-чинник

Відповідно до ГОСТ Р. 51689-2000 сервіс-чинник визначається, як допустиме перевантаження електродвигуна при номінальній напрузі і частоті. При цьому перевищення температури обмотки не має бути

більше допустимого для даного класу нагрівостійкості системи ізоляції, на 10%. Значення сервіс-фактора (1,15 або 1,1) указується в каталогах.

11 Напруга і частота

Асинхронні двигуни мають трифазну обмотку із з'єднанням фаз трикутником (Δ) або зіркою (Y).

Двигуни випускаються на всі стандартні напруги згідно з ІЕС 38: номінальну напругу 220 В(Δ)/380 В(Y); 230 В(Δ)/400 В(Y); 240 В(Δ)/415 В(Y); 380 В (Δ)/660В (Y), 400В (Δ)/690В (Y) при частоті мережі 50 Гц і 60 Гц. Двигуни на 60 Гц мають більшу на 20 % частоту обертання магнітного поля статора [48].

12 Температура навколишнього середовища; висота над рівнем моря; механічний вплив

Двигуни мають виконання для експлуатації в макрокліматичних районах з помірним (U), тропічним (T), помірно холодним ($УХЛ$) і холодним ($ХЛ$) кліматом в умовах, які визначаються категоріями розміщення:

- 1 – на відкритому повітрі;
- 2 – під навісом за відсутності прямої дії сонячного випромінювання і атмосферних опадів;
- 3 – в закритих приміщеннях без штучного регулювання кліматичних умов;
- 4 – в закритих приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами;
- 5 – для експлуатації в приміщеннях з підвищеною вологістю (наприклад, в неопалювальних і невентильованих підземних приміщеннях – в шахтах, в підвалах, в ґрунті та ін.).

У таблиці наведені значення кліматичних чинників – температури і вологості повітря для перерахованих вище умов, регламентованих ГОСТ 15150.

Двигуни призначені для експлуатації на висоті до 1000 м над рівнем моря. Якщо двигуни експлуатуються на висоті більше 1000 м, то потужність, що віддається, має бути понижена.

За умовами в частині дії механічних чинників зовнішнього середовища (вібрації, удари) двигуни відповідно до ГОСТ 17516 підрозділяються на групи залежно від призначення і місця установки.

13 Режими роботи

Електродвигуни загальнопромислового призначення основного виконання можуть працювати в різних режимах відповідно до ГОСТ 28173 (МЕК 34-1).

S1 – тривалий режим роботи – робота електродвигуна при незмінному навантаженні достатньо тривалий час для досягнення незмінної температури всіх його частин;

S2 – короткочасний режим роботи – робота електродвигуна при незмінному навантаженні протягом часу, недостатнього для досягнення всіма частинами електродвигуна сталої температури, після чого слідує зупинка на деякий час, достатній для охолодження до температури, не більше ніж на 20 °С, що перевищує температуру навколишнього середовища;

S3 – періодичний повторно-короткочасний режим роботи – послідовність ідентичних циклів роботи, кожен з яких включає час роботи при незмінному навантаженні, за який електродвигун не нагрівається до сталої температури, і час зупинки, за який він не охолоджується до температури навколишнього середовища;

S4 – періодичний повторно-короткочасний режим з впливом пускових процесів – послідовність ідентичних режимів роботи, кожен з яких включає час пуску, час роботи при незмінному навантаженні, за який електродвигун не нагрівається до сталої температури, і час зупинки, за який він не охолоджується до температури навколишнього середовища;

S5 – періодичний повторно-короткочасний режим з впливом пускових процесів і електричним гальмуванням – режим, який включає такі ж елементи, що і S4, з додатковим періодом швидкого електричного гальмування;

S6 – переміжний режим роботи – послідовність ідентичних циклів, кожен з яких включає час роботи з постійним навантаженням і час роботи на холостому ходу, причому тривалість цих періодів така, що температура електродвигуна не досягає сталого значення;

S7 – періодичний переміжний режим з частотою обертання, що періодично змінюється – послідовність ідентичних циклів, кожен з яких включає достатній час пуску, час роботи з постійним навантаженням і швидке електричне гальмування;

S8 – періодичний переміжний режим з частотою обертання, що періодично змінюється – це послідовність ідентичних циклів, кожен з

яких включає час розгону, роботу з незмінним навантаженням і частотою обертання, електричне гальмування, роботу при іншій частоті обертання і навантаженні і т. д.

Можливість використання асинхронних двигунів в тих або інших режимах визначається технічними умовами на двигуни і указується в каталогах.

Стандартизація трансформаторів

Основні відомості зі стандартизації трансформаторів зазвичай показують на паспортну таблицю трансформатора, яка представлена на рисунку 1.19

		ТОВ «ТРАНСФОРМАТОР СЕРВІС»																																							
026		тип ТМГ 63/10																																							
Потужність 63 кВА 50 Гц Фаз-3 Uk=4,50%																																									
Схема та група з'єднання Y/Yn-0																																									
<table><tr><th colspan="2">Сторона ВН</th><th colspan="2">Сторона НН</th></tr><tr><th>Ступ. пер.</th><th>Напр., В</th><th>Струм, А</th><th>Напр., В</th></tr><tr><td>I</td><td>10500</td><td></td><td></td></tr><tr><td>II</td><td>10250</td><td></td><td></td></tr><tr><td>III</td><td>10000</td><td>3.6</td><td>400</td></tr><tr><td>IV</td><td>9750</td><td></td><td>91</td></tr><tr><td>V</td><td>9500</td><td></td><td></td></tr></table>		Сторона ВН		Сторона НН		Ступ. пер.	Напр., В	Струм, А	Напр., В	I	10500			II	10250			III	10000	3.6	400	IV	9750		91	V	9500			<table><tr><td>Маса масла</td><td>130 кг</td></tr><tr><td>Маса активної частини</td><td>230 кг</td></tr><tr><td>Повна маса</td><td>465 кг</td></tr><tr><td>Ступінь захисту</td><td>IP00</td></tr><tr><td>Перемикання відгалужень</td><td>без збудження</td></tr></table>		Маса масла	130 кг	Маса активної частини	230 кг	Повна маса	465 кг	Ступінь захисту	IP00	Перемикання відгалужень	без збудження
Сторона ВН		Сторона НН																																							
Ступ. пер.	Напр., В	Струм, А	Напр., В																																						
I	10500																																								
II	10250																																								
III	10000	3.6	400																																						
IV	9750		91																																						
V	9500																																								
Маса масла	130 кг																																								
Маса активної частини	230 кг																																								
Повна маса	465 кг																																								
Ступінь захисту	IP00																																								
Перемикання відгалужень	без збудження																																								
Зав. № 052000 ТУ У31.1-31617591-001-2005																																									
ВИГОТОВЛЕНО В УКРАЇНІ 04.2010 р.																																									

Рис. 1.19 – Паспортна таблиця силового трансформатора

У навчальному процесі, крім того, застосовують технічні дані трансформаторів, які наведені в таблиці 1.2.

**Таблиця 1.2 – Паспортні дані силового трансформатора
ТМН-4000/35**

Позначення	Найменування	Кількісна характеристика
T	Трьохобмотувальний трансформатор	-
M	Природна циркуляція повітря і масла	-
H	Трансформатор з РПН	-
S_i	Номінальна потужність, кВ·А	4000
U_i	Номінальна напруга, кВ	35
$I_i = \frac{S_i}{\sqrt{3} \cdot U_i}$	Номінальний струм, А	$\frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 66,1$
I_x	Струм холостого ходу, %	0,9
U_κ	Напруга КЗ, %	7,5
P_κ	Втрати КЗ, Вт	33500
P_x	Втрати холостого ходу, Вт	5600
У/Д-11	Схема і група з'єднання обмоток	Зірка/ трикутник – 11
$Q_x = \sqrt{\left(\frac{I_x \cdot S_H}{100}\right)^2 - P_x^2}$	Втрати холостого ходу реактивні, квар	35,56
$Q_k = 3 \cdot I_{H.x}^2$	Втрати короткого замикання реактивні, квар	0,24
$P_\Sigma = P_x + \beta^2 \cdot P_k$	Повні втрати активні, Вт	-
$Q_\Sigma = Q_x + \beta^2 \cdot Q_k$	Повні втрати реактивні, квар	-
$\beta = \frac{S}{S_i}$	Коефіцієнт завантаження	-

Згідно з правилами технічної експлуатації стандартами передбачені наступні вимоги до систем охолодження трансформаторів [правила]:

- у трансформаторів із системою охолодження ДЦ (примусова циркуляція повітря і масла) максимальна температура не повинна перевищувати плюс 75° С;

- у трансформаторів із системами охолодження М (природна циркуляція повітря і масла) і Д (примусова циркуляція повітря та природна циркуляція масла) максимальна температура не повинна перевищувати плюс 95° С;

- у трансформаторів із системою охолодження Ц (примусова циркуляція води і масла) температура масла на вході до маслоохолодника повинна бути не вище ніж 70° С.

В процесі експлуатації трансформаторів з примусовою циркуляцією повітря і природною циркуляцією масла електродвигуни вентиляторів повинні автоматично вмикатися у разі досягнення температури масла 55° С.

Включення трансформаторів на номінальне навантаження допускається:

- із системами охолодження М і Д – за будь-якої мінусової температури повітря;

- із системами охолодження ДЦ і Ц – за температури повітря не більш ніж мінус 25° С. При зниженні температури більш ніж мінус 25° С система циркуляції масла повинна бути ввімкнена після того, як температура верхніх шарів після підігріву масла досягне мінус 25° С.

В аварійних умовах допускається увімкнення трансформаторів на повне навантаження незалежно від температури навколишнього повітря.

1.7 ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ЗАХИСТУ ТА КЕРУВАННЯ

Призначення, конструкція і принцип дії автоматичних вимикачів серії АВ3000

Автоматичні вимикачі АВ3000 компанії ВАТ “Промфактор” призначені для захисту електричних мереж від тривалих струмів перевантаження і струмів короткого замикання, а також для оперативного включення і відключення ділянок електричних кіл змінного струму частотою 50 Гц і напругою 660 В.

Автоматичні вимикачі серії АВ3000 виготовляють згідно з ТУ У 31.2-25019584-006-2004 [47] на номінальні струми від 10 до 2500 А.

Автоматичні вимикачі серії АВ3000 (кольорова вкладка, рис. 1.20) виробництва “Промфактор” є комутуючими пристроями триполюсного виконання семи типорозмірів. До їхньої конструкції входять дві

системи захисту: електромагнітна (від струмів короткого замикання) і теплова (від струмів перевантаження), які можуть комплектуватися незалежними розчеплювачами, додатковими та сигнальними контактами, перехідними шинами і ручним приводом.

Диференційні автоматичні вимикачі (АД-12, АД-14) забезпечують ефективний захист людини від ураження електричним струмом у випадку його дотику до струмопровідних частин або елементів електрообладнання, яке може потрапити під напругу у результаті ушкодження ізоляції струмопровідних частин. При цьому дифавтомат забезпечує ефективний захист електрообладнання від струмів короткого замикання і струмів перевантаження. Крім того, у ряді виконань АД-12 і АД-14 передбачено захист від імпульсних струмів перенапруги у мережі.

Конструкційно диференційний автомат – це поєднання двох функціональних вузлів: електронного модуля диференційного захисту і автоматичного вимикача. Електронний модуль складається із диференційного трансформатора струму, електронного підсилювача зі ступеневим пристроєм, виконавчого електромагніту скидання.

Реле перевищення напруг ДПФ-4

Реле перевищення напруг ДПФ-4 (кольорова вкладка, рис. 1.21) призначено для контролю напруги живлення в трифазних мережах та захисту споживачів від наслідків зростання або падіння напруги живлення поза встановлені межі [47].

Принцип дії

За допомогою потенціометрів одночасно для всіх трьох фаз встановлюється нижній (U1) та верхній (U2) пороги напруги живлення, які утворюють так зване вікно напруг. В межах даного вікна фазна напруга може мінятися без спрацювання реле. Правильна напруга живлення відображається за допомогою свічення зеленого світлодіода (при цьому контакти реле знаходяться в положенні 11–12). Зростання або падіння напруги живлення в одній з фаз поза встановлені пороги призводить до спрацювання реле (контакти реле перемикаються в положення 11–10). Падіння напруги в одній з фаз нижче встановленого значення U1 відображається за допомогою свічення червоного світлодіода (U1). Зростання напруги в одній з фаз вище встановленого

значення U_2 відображається за допомогою свічення червоного світлодіода (U_2). При умові повернення напруги живлення до норми, контакти реле перемикаються в положення 11–12 автоматично.

При значній нестабільності та частих змінах напруги живлення поза встановленні межі (щонайменше 10 раз на протязі 1 хвилини), реле блокується протягом 10 хвилин (при цьому контакти реле знаходяться в положенні 11–10) (рис. 1.22.). Це запобігає частим ввімкненням та вимкненням споживачів електроенергії. Перебування в стані блокування відображається за допомогою свічення жовтого світлодіода.

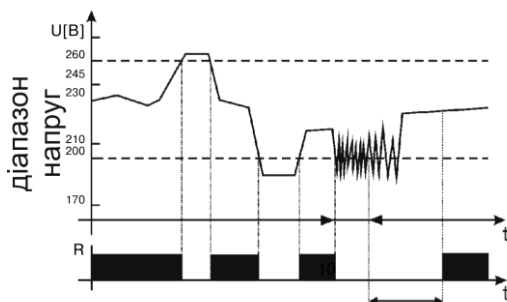
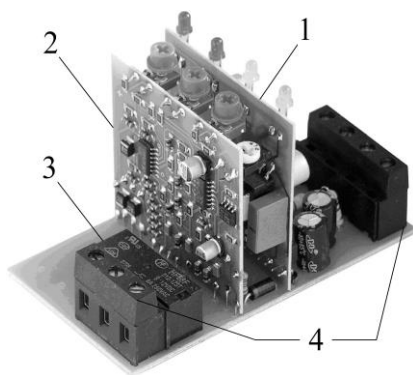


Рис. 1.22 – Принцип блокування реле

Конструкція реле

Реле перевищення напруг ДПФ-4 є електронно-механічним пристроєм і побудовано на сучасній елементній базі.



- 1 – плата живлення та індикації; 2 – плата компараторів;
3 – механічне реле; 4 – клеми для підключення провідників;

Рис. 1.23 – Конструкція реле

Вибір автоматичних вимикачів

Для вибору і настроювання захисної апаратури потрібно мати дані:

I_n – номінальний струм електроустановки, що довгостроково діє по апаратурі захисту, А;

$I_{\text{макс.}}$ – максимальний струм електроустановки, що короткочасно діє по апаратурі, А;

$T_{\text{макс.}}$ – тривалість дії максимального струму по апаратурі захисту, с.

Вибір автоматичних вимикачів (АВ) виконується за наступними показниками та умовами:

1. За типом і серією.

2. За номінальною напругою

$$U_{n\text{ АВ}} \geq U_{\text{м}}, \quad (1.81)$$

де $U_{n\text{ АВ}}$ – номінальна напруга АВ, В;

$U_{\text{м}}$ – номінальна напруга мережі, В.

3. За номінальним струмом

$$I_{n\text{ АВ}} \geq I_{\text{розркола}} \quad (1.82)$$

4. За виконанням:

- кількості головних полюсів: одно-, дво-, триполюсний;
- виду основних розчіплювачів: електромагнітний (ЕМР), комбінований (КМР) та ін.;
- виду додаткових розчіплювачів: без додаткових розчіплювачів, незалежний розчіплювач, мінімальний розчіплювач, нульовий розчіплювач, напівпровідниковий розчіплювач;
- наявності вільних контактів;
- наявності регулювання струму неспрацьовування теплового розчіплювача;
- виду привода: ручний електромагнітний, ручний дистанційний.

5. За номінальним струмом теплового розчіплювача

Для мережі з АД, при наявності регулювання струму неспрацьовування теплового розчіплювача з умови

$$I_{n\text{ тр}} \geq I_{n\text{ АД}} \quad (1.83)$$

з наступним регулюванням струму неспрацьовування теплового розчіплювача, що забезпечує рівність

$$I_{n\text{ тр}} = I_{n\text{ АД}}. \quad (1.84)$$

Для мережі з АД з тривалим режимом роботи і легкими умовами пуску ($t_n = 10$ с) з умови

$$I_{нтр} = I_{нАД} \cdot \quad (1.85)$$

Для мережі з АД з тривалим режимом роботи і важкими умовами пуску ($t_n > 10$ с) з умови

$$I_{нтр} = 1,25 I_{нАД} \cdot \quad (1.86)$$

6. За струмом відсічки електромагнітного розчіплювача з умови

$$I_{відс.РМ} \geq I_{пуск.розр}, \quad (1.87)$$

де $I_{відс.РМ}$ – струм відсічки ЕМР, А;

$I_{пуск.розр}$ – розрахункове значення пускового струму в мережі, яку захищає АВ, А.

При цьому, для захисту електричної мережі з одним АД

$$I_{пуск.розр} = (1,5 \dots 1,8) I_{нАД} \cdot \quad (1.88)$$

Для захисту електричної мережі з кількома АД

$$I_{пуск.розр} = (1,5 \dots 1,8) \left[\sum_1^n I_n + [I_n - I_n] \right], \quad (1.89)$$

де $\sum_1^n I_i$ – сума номінальних струмів одночасно працюючих АД;

$(I_n - I_n)$ – різниця між значеннями пускового і номінального струмів АД, у яких ці струми найбільші.

7. За кліматичним виконанням, категорією розміщення і ступенем захисту.

? КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що називається допустимим тепловим режимом роботи електричних машин і апаратів?
2. Які причини нагріву електричних машин та апаратів?
3. Пояснити, чому втрати активної потужності у струмопровідних частинах електричних машин (апаратів) більші при живленні від джерела змінного струму.
4. На які види втрат поділяються втрати активної потужності у неструмопровідних частинах електричних машин (апаратів)?
5. Як визначити втрати активної потужності у ізоляції?
6. До чого призводить перегрів електричних машин і апаратів?
7. Які припущення роблять при дослідженні процесів нагрівання та охолодження електричних машин?
8. Пояснити, що таке режим теплової рівноваги в електричній машині.
9. Визначення та фізична суть сталої часу нагріву електричних машин.
10. Як визначити сталу часу нагріву? В чому полягає метод дотичної?
11. В чому полягає аналітичний метод визначення сталої часу нагріву?
12. Як визначити сталу часу нагріву? В чому полягає метод нормованого значення?
13. Чим визначається допустима тривалість роботи ЕМ в режимі перевантаження?
14. Які існують види теплообміну? Що таке теплопровідність?
15. Що таке конвекція, випромінювання?
16. Перерахувати способи охолодження електричних машин і дати характеристику кожному з них.
17. Які особливості та переваги водневого охолодження електричних машин?
18. Які способи охолодження електричних машин є найбільш ефективними?
19. Які режими роботи ЕМ Ви знаєте?
20. Які режими роботи електричних апаратів Ви знаєте?

2 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 БУДОВА І ПРИНЦИП ДІЇ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Принцип дії машини постійного струму

Принцип дії машини постійного струму розглядається на основі моделі машини постійного струму (рис. 2.1). Статор машини постійного струму називається індуктором. Він складається з двох полюсів 1, що створюють основний магнітний потік Φ , і ярма (станини), не наведеного на рисунку 2.1. Ротор найпростішої машини постійного струму складається з якоря 2, який представлений у вигляді сталевого осердя з обмоткою з одного витка, і колектора 3, який представлений у вигляді двох ізольованих одна від одної пластин. До колектора прилягають дві нерухомі щітки 4, що з'єднують обмотку якоря із зовнішніми колами.

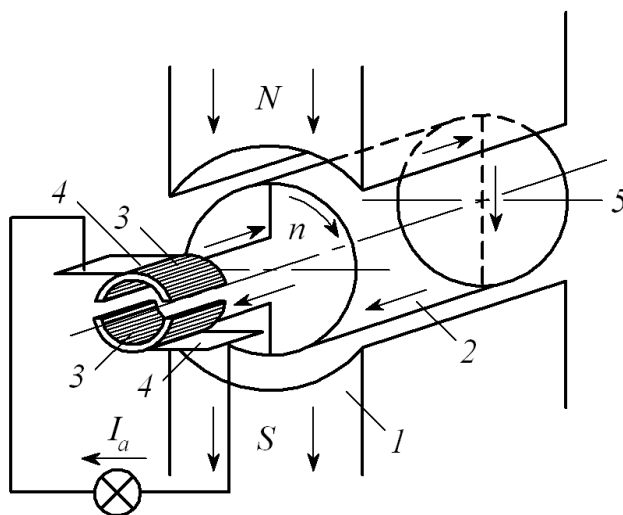


Рис. 2.1 – Модель машини постійного струму

Магнітний потік Φ виходить з північного полюса N, пронизує ярмо, входить у південний полюс S і замикається по ярму, повертаючись до північного полюса N.

Величина магнітної індукції в повітряному проміжку між якорем і полюсами змінюється від максимального значення під полюсами до нуля на лінії геометричної нейтралі 5.

Режим генератора. Якір машини постійного струму обертається первинним двигуном за годинниковою стрілкою. В провідниках обмотки якоря індукується електрорушійна сила (ЕРС), напрям якої може бути визначено за правилом правої руки. Оскільки потік полюсів Φ вважається постійним, то індукована ЕРС створюється виключно внаслідок обертання якоря і називається *ЕРС обертання*.

Величина ЕРС обертання, що індукується в провіднику обмотки якоря,

$$e_{np} = B \cdot l \cdot v, \quad (2.1)$$

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

l – активна довжина провідника, тобто довжина, протягом якої провідник розташований у магнітному полі;

v – лінійна швидкість руху провідника.

В обох провідниках, внаслідок симетрії, індукуються однакові e_{np} , які складаються за контуром витка, утворюючи повну ЕРС якоря машини

$$E_a = 2e_{np} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v. \quad (2.2)$$

Оскільки провідники обмотки якоря при обертанні проходять по чергово під північним та південним полюсом машини, то напрям ЕРС в провіднику змінюється. За формою крива ЕРС провідника повторює криву розподілення індукції B в повітряному проміжку (рис. 2.2, а). Частота ЕРС залежить від частоти обертання якоря і кількості пар полюсів.

При підключенні обмотки якоря за допомогою щіток до зовнішньої мережі, по ній і по обмотці якоря потече струм I_a . В обмотці якоря струм буде змінним і його крива буде аналогічною кривій ЕРС (рис. 2.2, а). Однак в зовнішній мережі напрям струму буде постійним, що пояснюється дією колектора. При обертанні якоря з колектором (рис. 2.1) і зміні напрямку ЕРС в провіднику, одночасно відбувається зміна колекторних пластин під щітками, внаслідок чого під верхньою щіткою завжди буде знаходитися пластина, що з'єднана з провідником, розташованим під північним полюсом, а під нижньою щіткою – пластина, з'єднана з провідником, розташованим під

південним полюсом, в результаті чого полярність щіток і напрям струму в зовнішній мережі залишаються незмінними.

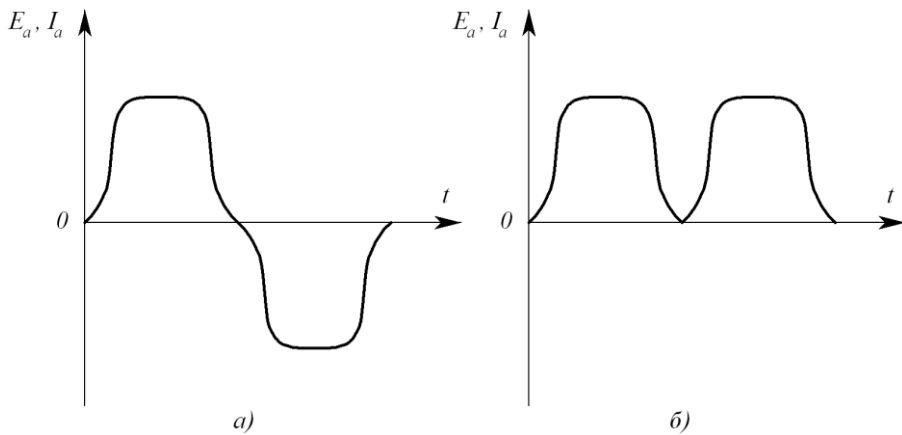


Рис. 2.2 – Форма кривої ЕРС і струму в якорі (а) і зовнішній мережі (б) моделі машини постійного струму

Таким чином, в генераторі колектор виконує функцію механічного випрямляча, який перетворює змінний струм обмотки якоря в постійний струм в зовнішній мережі.

Змінивши знак напівперіода кривої ЕРС і струму I_a (рис. 2.2, а), отримаємо форму кривої ЕРС і струму I_a в зовнішній мережі (рис. 2.2, б).

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

$$U_a = E_a - I_a \cdot r_a. \quad (2.3)$$

Провідники обмотки якоря із струмом I_a розташовані в магнітному полі і на них діють електромагнітні сили (рис. 2.3, а)

$$F_{np} = B \cdot l \cdot I_a, \quad (2.4)$$

напрямок яких визначається за правилом лівої руки. Електромагнітні сили створюють механічний обертовий момент M_{em} , який називається електромагнітним моментом,

$$M_{em} = F_{np} \cdot D_a, \quad (2.5)$$

де D_a – діаметр якоря, мм.

В режимі генератора M_{em} діє в протилежному обертанню якоря напрямку і є гальмівним.

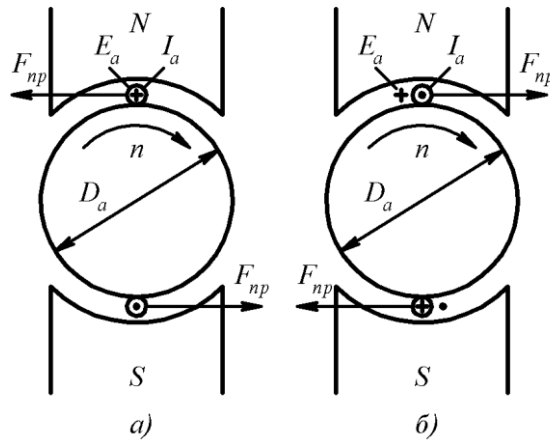


Рис. 2.3 – Робота моделі машини постійного струму в режимі генератора а) і двигуна б)

Режим двигуна. До обмотки якоря підводиться постійна напруга U_a від зовнішнього джерела живлення, по обмотці якоря протікає струм I_a . При цьому на провідники обмотки якоря діють електромагнітні сили F_{np} і створюється електромагнітний момент M_{em} (рис. 2.3, б). Значення величин F_{np} і M_{em} визначаються рівняннями (2.4) і (2.5). При достатньому значенні M_{em} якорь машини буде обертатися і розвивати механічну потужність. Момент M_{em} при цьому є обертовим і діє в напрямку обертання якоря.

В режимі двигуна колектор перетворює постійний струм, що споживається з зовнішньої мережі, в змінний струм, що протікає в обмотці якоря, і виконує функції механічного інвертора струму.

Провідники обмотки якоря в режимі двигуна обертаються в магнітному полі, в них індукуються E_a , величина якої визначається виразом (2.2). При збереженні напрямку обертання якоря, напрямки напруги U_a і струму I_a в обмотці якоря при зміні режиму змінилися на протилежний (рис. 2.3, б).

Таким чином, E_a в двигуні постійного струму направлена зустрічно прикладеній напрузі U_a і струму I_a в обмотці якоря, тому E_a в якорі двигуна постійного струму називається *протиЕРС*.

Напруга, прикладена до затискачів якоря двигуна постійного струму, врівноважується E_a і величиною падіння напруги на опорі обмотки якоря r_a

$$U_a = E_a + I_a \cdot r_a. \quad (2.6)$$

Аналізуючи рівняння (2.3) і (2.6), можна зробити висновок, що в режимі генератора $U_a \leq E_a$, а в режимі двигуна $U_a \geq E_a$.

Принцип зворотності

Грунтуючись на розглянутому принципі дії машини постійного струму, можна зробити висновок, що будь-яка машина постійного струму може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Така якість притаманна всім типам обертових електричних машин і називається *зворотністю*. Можливість зміни режиму роботи машини постійного струму пояснюється можливістю зміни напрямків моментів, ЕРС та струмів в окремих елементах (рис. 2.4).

Таким чином, для зміни режиму роботи машини постійного струму при постійній полярності полюсів і щіток і при незмінному напрямі обертання необхідно змінити напрям струму в обмотці якоря.

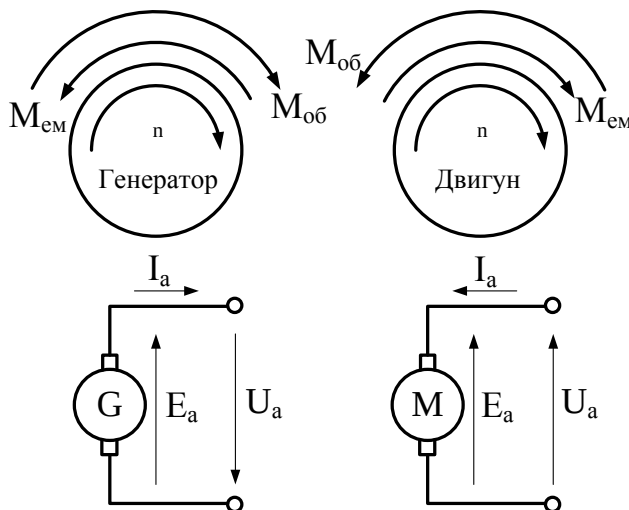


Рис. 2.4 – Напрямки ЕРС, струму і моментів в генераторі і двигуні постійного струму

Будова машин постійного струму

Машина постійного струму складається зі статора, ротора (якоря) і повітряного проміжку.

Нерухома частина – статор – складається зі станини (корпуса), ярма, головних і додаткових полюсів з обмотками.

Ярмо в машинах постійного струму призначено для створення шляху, за яким замикається постійний магнітний потік машини. Зазвичай ярмо виконується масивним зі сталейних труб (для машин малої потужності), сталюого прокату або сталюого лиття і одночасно виконує функції станини – частини, до якої кріпляться інші нерухомі частини і за допомогою якої машина кріпиться до фундаменту або основи.

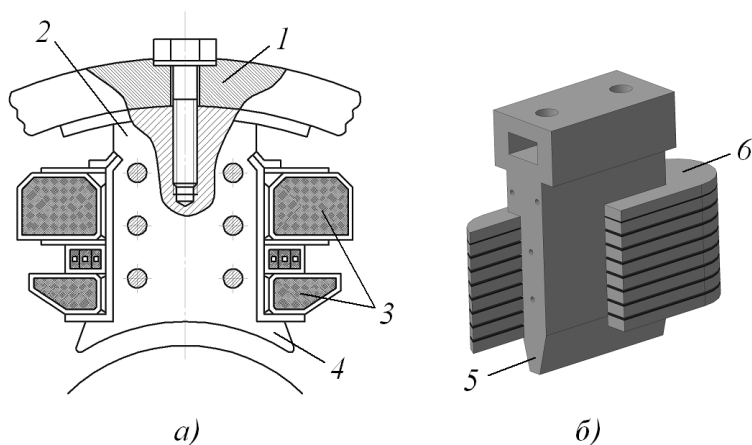
Головні полюси призначені для створення основного магнітного потоку машини і складаються з осердя і обмотки, додаткові полюси призначені для зменшення іскріння під щітками. Осердя полюсів набираються з листів електротехнічної сталі товщиною 0,5–1 мм або з листів конструкційної сталі товщиною до 2 мм (рис. 2.5). Оскільки магнітний потік в сталих режимах роботи машини практично не змінюється, то виштамповані листи не ізолюються один від іншого. Осердя полюсів стягуються шпильками або масивними сталевими стрижнями. Нижня, розширена частина осердя головних полюсів називається полюсним наконечником або полюсним башмаком.

Обмотки головних і додаткових полюсів виготовляють з ізолюваного мідного проводу круглого або прямокутного перерізу (рис. 2.5). Розташована на полюсі обмотка часто розділяється на декілька котушок, які розділяються дистанційними шайбами, для покращення охолодження.

Ротор машини постійного струму складається з якоря і колектора, які розташовані на валу. Осердя якоря набирається з штампованих дисків електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм (рис. 2.6).

Диски насаджуються безпосередньо на вал (в машинах малої та середньої потужності) або набираються на якірну втулку (в машинах великої потужності). Осердя якоря діаметром більше 100 см виготовляються зі штампованих сегментів. В осерді якоря залежно від вибраної системи вентиляції можуть бути аксіальні або радіальні канали. Аксіальні канали утворюються виштампованими в дисках осердя отворами. Радіальні канали утворюються дистанційними

розпірками, які розділяють осердя на окремі пакети. В пази на поверхні якоря укладається обмотка якоря (рис. 2.7).



1 – станина; 2 – осердя основного (головного) полюса; 3 – обмотка збудження; 4 – полюсний наконечник; 5 – осердя додаткового полюса; 6 – обмотка додаткового полюса

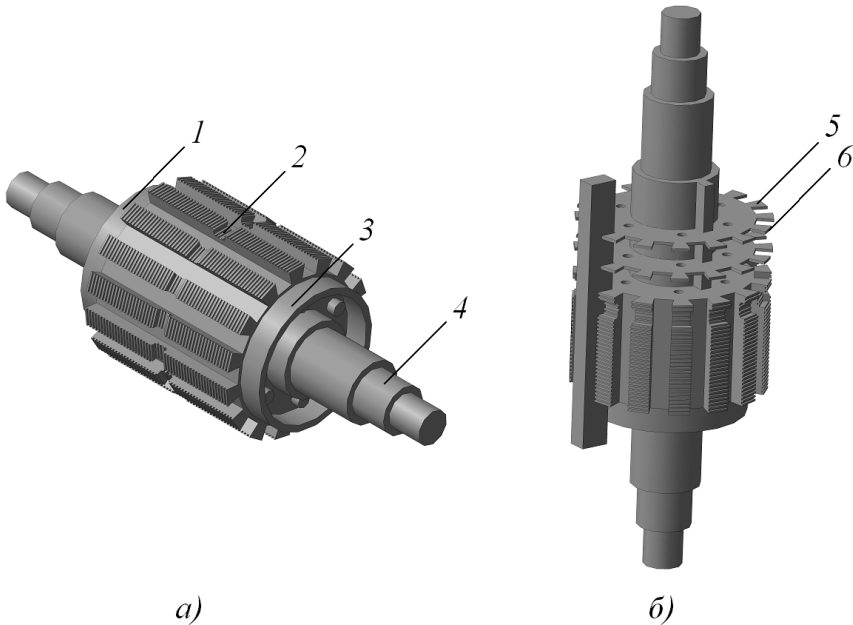
Рис. 2.5 – Будова основних і додаткових полюсів

Обмотку якоря виготовляють з круглого або прямокутного обмотувального проводу. Зазвичай, обмотка складається з окремих, заздалегідь намотаних якірних котушок, які ізолюють і укладають в пази осердя якоря. Обмотку виконують двошаровою, в кожний паз укладають дві сторони різних якірних котушок – одну над іншою. Кожна якірна котушка включає в себе декілька секцій, кінці яких припаюють до відповідних колекторних пластин. Секції обмотки можуть бути одно- або багатовитковими.

Колектор машини постійного струму (рис. 2.8) складається з мідних пластин товщиною 3–15 мм, ізольованих одна від іншої міканітовими прокладками товщиною близько 1 мм. Пластини мають трапецеїдальний переріз і разом з прокладками складають кільце, яке скріплюється за допомогою натискних фланців.

Секції обмотки якоря впаюють в прорізи, які розташовані у виступаючій частині пластин. В машинах малої і середньої потужності використовують колектори, в яких мідні пластини і міканітові прокладки запресовані в пластмасу. Поверхню зібраного колектора

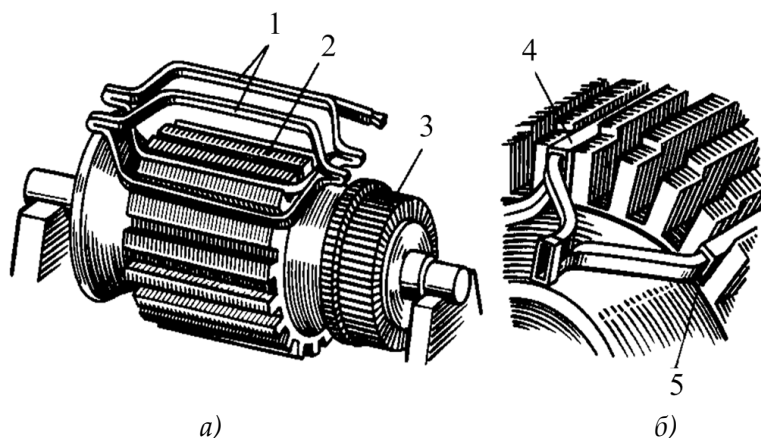
обточують на токарному верстаті і шліфують. Для того, щоб міканітові прокладки при спрацюванні колектора не виступали над пластинами і не викликали вібрації щіток, їх фрезерують на 0,8–1,5 мм нижче поверхні колектора.



1, 3 – натискні шайби (для утримання обмотки); 2 – виточка для укладання бандажа; 4 – місце для пресування колектора; 5 – ізоляційна плівка; 6 – сталевий лист

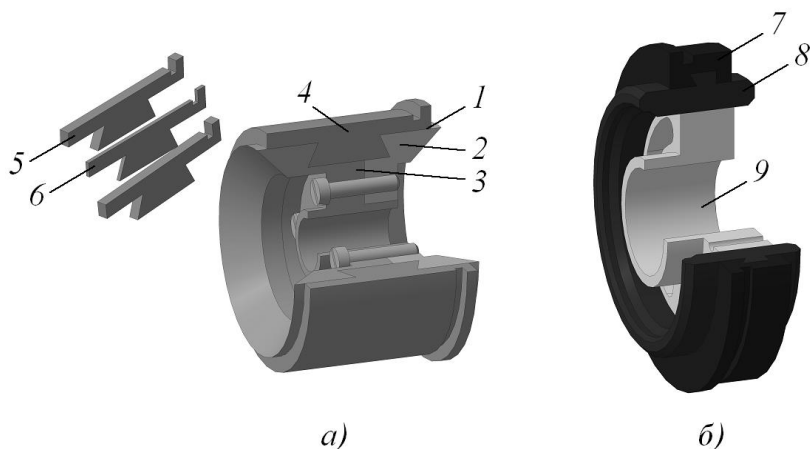
Рис. 2.6 – Будова осердя якоря (а) і його збирання (б)

Для відведення та підведення струму до колектора використовують щітчний апарат, до складу якого входять: щітки, щіткоутримувач, щітчні пальці, траверса і струмові шини. Щіткоутримувачі (рис. 2.9) закріплюються на щітчних пальцях, які кріпляться до щіточної траверси і електрично ізолюються від неї. Траверса закріплюється на нерухомій частині машини. Зазвичай передбачається можливість повороту траверси для встановлення щіток в правильне положення.



1 – якірні котушки; 2 – осердя якоря; 3 – колектор; 4 – верхня сторона якірної котушки; 5 – нижня сторона якірної котушки

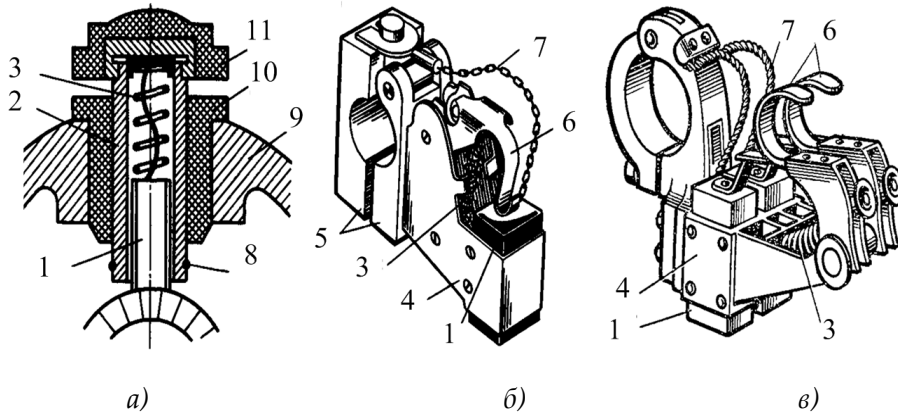
Рис. 2.7 – Будова якірних котушок а) і розташування їх в пазах б)



1 – ізоляційні манжети; 2 – натискний фланець; 3 – корпус;
4 – колекторна пластина; 5 – виступаюча частина колекторної пластини; 6 – ізоляційна прокладка; 7 – колекторна пластина з ізоляційними прокладками; 8 – пластмаса; 9 – втулка

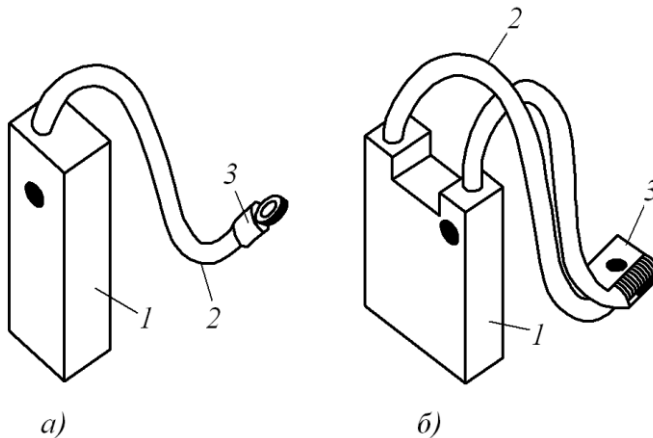
Рис. 2.8 – Будова колектора машини постійного струму з металевим а) і пластмасовим б) корпусом

Залежно від складу, способу виготовлення та фізичних властивостей всі щітки (рис. 2.10) ділять на шість основних груп: вугільно-графітні, графітні, електрографітовані, мідно-графітні, бронзо-графітні та срібно-графітні. Вибір і застосування щіток залежить від типу машини, умов і режимів роботи.



1 – щітка; 2 – обойма; 3 – пружина; 4 – обойма; 5 – затискачі для кріплення до щіткового пальця; 6 – натискні пластини; 7 – щітковий канатик; 8 – затискач для вивідного провідника; 9 – підшипниковий щит; 10 – ізоляційна втулка; 11 – ковпак

Рис. 2.9 – Будова щіткутримувачів малої (а), середньої (б) і великої (в) потужності



1 – щітка; 2 – щітковий канатик; 3 – кабельний наконечник

Рис. 2.10 – Будова щіток малої (а) і великої (б) потужності

Колектор і щіточний апарат – найбільш відповідальні вузли, від конструкції і якості яких залежить надійна робота машини постійного струму. Загальна будова машини постійного струму наведена на рисунку 2.11 (кольорова вкладка).

Серії машин постійного струму

Машини постійного струму використовуються як двигуни і як генератори. Широке розповсюдження машин постійного струму, незважаючи на більшу вартість і складність в експлуатації і обслуговуванні порівняно з іншими видами обертових машин, пояснюється можливістю дуже простого і надійного регулювання частоти обертання, більшими пусковими моментами і високою перевантажувальною здатністю.

Машини постійного струму серії П застосовуються як двигуни і генератори у різних галузях промисловості і сільського господарства. Випуск машин серії П припинений, але поки що в експлуатації знаходиться значна кількість машин. Електричні машини серії П охоплюють діапазон потужностей від 0,3 до 200 кВт (при 1500 об/хв) і мають 11 габаритів. Габарит визначається зовнішнім діаметром якоря.

Електричні машини серії 2П замінюють машини серії П, а також спеціалізовані машини серій ПС(Т), ПБС(Т), ПР. Серія 2П машин постійного струму охоплює висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт.

Машини цієї серії призначені для роботи в електроприводах з широким регулюванням швидкості. У порівнянні з попередніми серіями в машинах серії 2П підвищена перевантажувальна здатність, розширені діапазон регулювання частоти обертання, поліпшені динамічні властивості, зменшені шум і вібрації, підвищена потужність на одиницю маси, збільшені надійність і ресурс роботи.

Виходячи з вимог сучасного електропривода, в основу створення нового покоління машин серії 4П покладені наступні принципи диференціації двигунів постійного струму:

- за регульовальними властивостями: двигуни з нормальним регулюванням – до 1:5 і двигуни з широким регулюванням – до 1:1000;
- за типом конструкції: закриті, захищені;
- за умовами експлуатації: нормальні, з важкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регульовальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму. З метою значного зниження (в 2–3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів у новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А. Це визначило можливість застосування для виробництва статора, обробки корпусних деталей, складання і випробувань машин постійного струму технологічного устаткування, створеного для серії 4А.

В уніфікованій конструкції типу 4ПО і 4ПБ магнітопровід статора неявнополюсний з розподіленими обмотками в пазах. Обмотка збудження укладається у два пази в межах полюсної дуги основного потоку, компенсаційна обмотка розташовується рівномірно у всіх пазах розточки статора.

В уніфікованій конструкції 4ПО і 4ПБ однакові габарити із двигунами серії 4А, можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові щити, деталі вентиляційного вузла, коробки виводів, підшипники і їхні кришки.

Перевагами уніфікованої конструкції двигунів постійного струму в порівнянні з явнополюсними традиційної конструкції є:

- розподіл статорних обмоток двигунів у порівняно великій кількості пазів, що приносить позитивний ефект, який виражається в поліпшенні тепловіддачі і дозволяє істотно збільшити щільності струмів;
- повна компенсація поля реакції якоря по всій його окружності;
- застосування повністю шихтованого магнітопроводу, що зменшує його магнітну несиметрію і практично усуває відставання в часі змін магнітного потоку додаткових полюсів від зміни струму в їхніх обмотках і, отже, підвищує комутаційну здатність двигунів у стаціонарних і динамічних режимах роботи;
- перехід до ступеня захисту IP44 в уніфікованих двигунах від звичайно застосовуваної у двигунах традиційної явнополюсної конструкції ступеня захисту IP23, що підвищує надійність цих двигунів в експлуатації.

Заміна двигунів серії 2П як закритого, так і захищеного виконання на двигуни уніфікованої конструкції серії 4П забезпечує збільшення номінальної потужності в заданому габариті на одну шкалу, зниження матеріалоемності на 15–20%, зменшення витрати

обмотувальної міді на 25–35% і зниження трудомісткості виготовлення в 2,5–3 рази.

2.2 ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Основні елементи обмоток

Обмотка якоря – важливий елемент машини постійного струму. Для забезпечення надійної роботи машини обмотка якоря повинна відповідати наступним вимогам:

- обмотка повинна бути розрахована на задані величини напруги і струму навантаження, що відповідає номінальній потужності, і мати необхідну електричну, механічну і термічну стійкість, які забезпечують достатньо тривалий термін роботи машини;
- конструкція обмотки повинна забезпечувати задовільні умови проходження комутаційних процесів на колекторі;
- витрати матеріалів при виготовленні обмотки повинні бути мінімальними;
- технологія виготовлення обмотки повинна бути простою.

В сучасних машинах використовують обмотку барабанного типу, в яких провідники обмотки укладають в двох шарах в пазах, розташованих на зовнішній поверхні якоря (рис. 2.12).

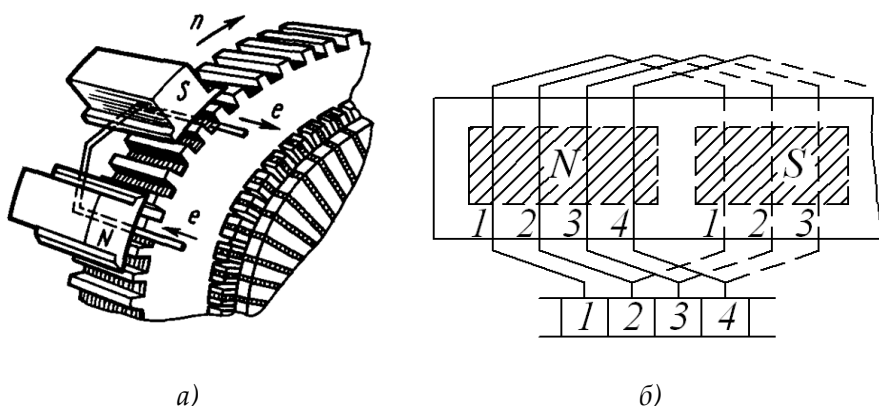


Рис. 2.12 – Схема розташування провідників обмотки (а) і розгорнута схема двошарової обмотки (б)

Для того, щоб ЕРС, індуковані в сторонах витка, додавались, сторони його слід розташовувати під полюсами протилежної полярності. Тільки в цьому випадку в кожному витку індукується ЕРС в два рази більша, ніж в одному провіднику.

Обмотки барабанного типу розділяють на такі основні групи: петльові (паралельні), хвильові (послідовні) і комбіновані (паралельно – послідовні). Основний елемент обмотки якоря – секція. Секцією називається частина обмотки якоря, що складається з декількох витків і знаходиться між двома колекторними пластинами, розташованими поряд за схемою обмотки. Кожна секція має дві активні сторони, укладені в пази якоря, з'єднані між собою лобовими з'єднаннями. Сторони секцій розташовують на відстані полюсної поділки – відстані між серединами полюсів по окружності якоря.

Полюсна поділка визначається

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}. \quad (2.7)$$

Обмотки якоря характеризуються : кількістю секцій S ; кількістю пазів ротора Z ; кількістю секцій, що припадають на один паз $S_n = S/Z$; кількістю витків секції W_c ; кількістю пазових сторін в обмотці N ; кількістю пазових сторін в одному пазу $n_n = N/S = 2W_c S_n$. Верхня пазова сторона однієї секції і нижня пазова сторона іншої секції, що розташовуються в одному пазу, утворюють елементарний паз. Кількість елементарних пазів Z_e визначається кількістю секцій, що припадають на один паз, $S_n = S/Z$ (рис. 2.13).

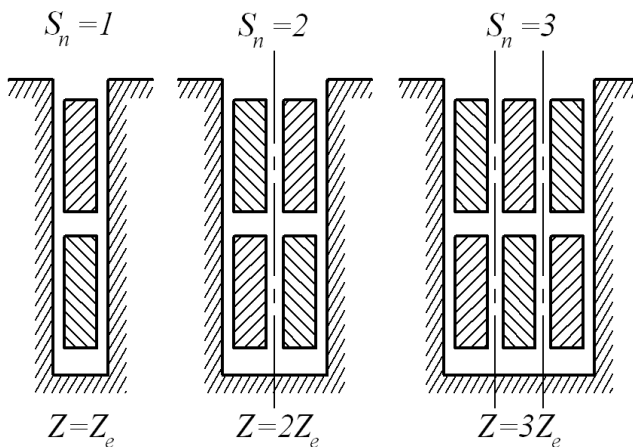


Рис. 2.13 – Кількість елементарних пазів

Кінці секцій приєднують до колекторних пластин, при цьому до кожної колекторної пластини приєднують початок однієї секції і кінець іншої. Кількість секцій S дорівнює кількості колекторних пластин K . Всі секції зазвичай мають однакову кількість витків.

В обмотці також розрізняють:

- основний (перший частковий) крок y_1 – відстань між початком і кінцем секції, тобто ширина секції;
- другий частковий крок y_2 – відстань між кінцевою стороною однієї секції і початковою стороною наступної за нею за схемою обмотки;
- результуючий крок y – відстань між початковими сторонами двох секцій, розташованих одна за одною за схемою обмотки;
- крок обмотки по колектору y_k – відстань між початком і кінцем секції по колектору, який вимірюють кількістю пропущених ізоляційних прокладок. Кроки вимірюють кількістю пазів якоря.

Основний крок y_1 повинен дорівнювати полюсній поділіці τ . При $y_1 = \tau$ крок називають діаметральним, при $y_1 \geq \tau$ – подовженим, при $y_1 \leq \tau$ – скороченим.

Прості петльові і хвильові обмотки

При виконанні простої петльової обмотки секцію приєднують до сусідніх колекторних пластин (рис. 2.14). Тому що $K = S$, то результуючий крок обмотки y і крок по колектору y_k рівні. При петльовій обмотці $y = y_1 - y_2$ і $y_k = y$. Обмотку називають простою, якщо $y = y_k = \pm 1$. У цій обмотці кожна наступна секція розташована поруч із попередньою, а якірна котушка має форму петлі, що обумовило назву цієї обмотки. Зазвичай, при виконанні обмотки приймають $y_k + 1$ (неперехрещена обмотка), тому що в цьому випадку знижується витрата обмотувального провода.

В простій петльовій обмотці секції, розташовані під кожною парою полюсів, утворюють дві паралельні гілки. У кожную з паралельних гілок входить $S_a = S/(2p)$ секцій, тому число паралельних гілок у всій обмотці

$$2a = S/S_a = 2p, \quad (2.7)$$

де a – кількість паралельних гілок;

$2p$ – кількість полюсів машини.

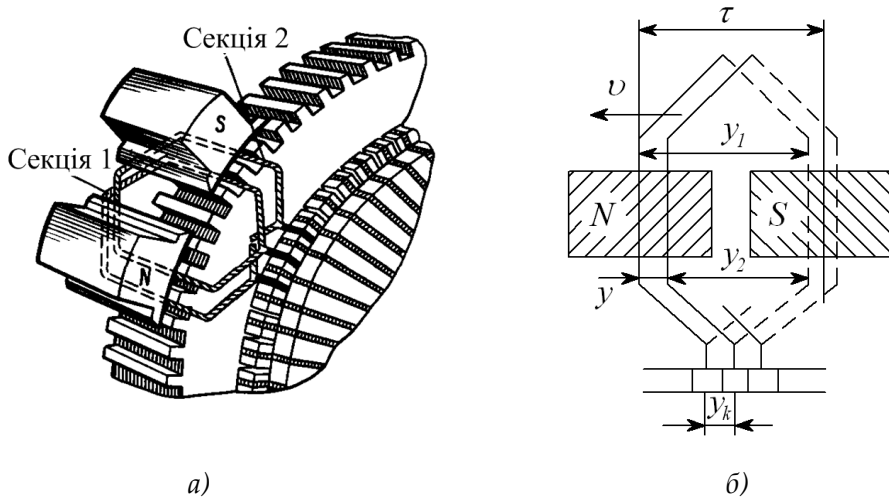


Рис. 2.14 – Загальний вигляд петльової обмотки (а) і схема з'єднання її секцій (б)

Умова $2a = 2p$ виражає основну властивість простої петльової обмотки: чим більше число полюсів, тим більше паралельних гілок має обмотка. Отже, тим більше щіткових пальців повинно бути в машині. Тому просту петльову обмотку називають паралельною. Електрорушійні сили E , індуковані у всіх паралельних гілках петльової обмотки, теоретично повинні бути рівні. Практично через технологічні допуски у величинах повітряного проміжку під різними полюсами, дефектів лиття в корпусі та інших причин магнітні потоки окремих полюсів трохи розрізняються між собою, а тому в паралельних гілках індукуються неоднакові ЕРС. Різниця між ними становить 3...5%, однак внаслідок невеликого опору обмотки якоря, ця ЕРС виявляється достатньою, для того, щоб по паралельних гілках, навіть при холостому ході, проходили досить значні зрівняльні струми, які завантажують щітки і сприяють виникненню іскріння на колекторі. Для того, щоб зрівняльні струми замикалися не по щітках, в петльових обмотках передбачають зрівняльні з'єднання точок обмоток, що мають теоретично рівні потенціали. Такі зрівняльні з'єднання називаються зрівняльними з'єднаннями першого роду. Зазвичай між собою з'єднують колекторні пластини, до яких підключені рівнопотенційні точки обмотки. Практично досить мати одне-два зрівняльних з'єднання на кожну групу секцій, що лежать в

одному пазу якоря, тобто оздоблювати зрівнювачами $1/2$ або $1/3$ колекторних пластин. Зрівняльні з'єднання розташовують під лобовими частинами обмотки поруч із колектором. У цьому випадку вони перебувають поза дією магнітного поля головних полюсів і в них ЕРС не індукується. Обминаючи по зрівняльних з'єднаннях струми, ідучи по паралельних гілках обмотки якоря, створюють магніторушійні сили (МРС), які зменшують нерівність магнітних потоків окремих полюсів.

При виконанні простої хвильової обмотки секції, що лежать під різними полюсами, з'єднують послідовно (рис. 2.15).

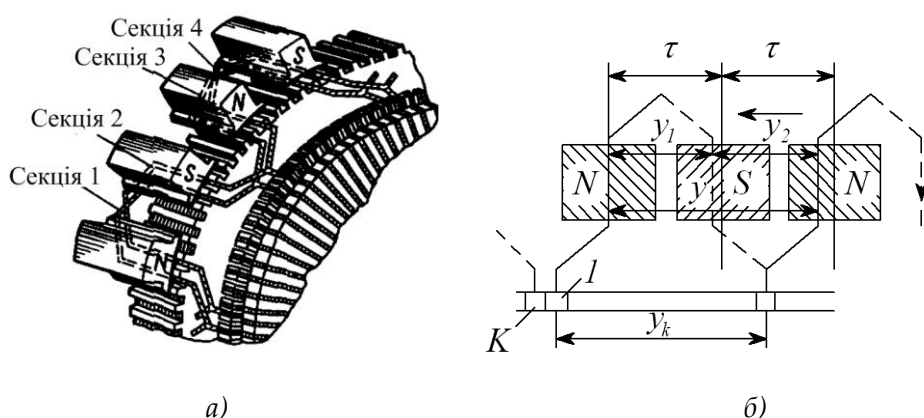


Рис. 2.15 – Загальний вигляд хвильової обмотки (а) і схема з'єднання її секцій (б)

При цьому після одного обходу окружності якоря, тобто послідовного з'єднання p секцій, приходять до колекторної пластини, розташованої поруч із вихідною. Результуючий крок обмотки $y = y_1 + y_2$, часткові кроки $y_1 \approx y_2$ приблизно дорівнюють полюсній поділі τ , а крок по колектору y_k – подвійній полюсній поділі 2τ . Між кроком по колектору y_k і кількістю колекторних пластин K існує залежність $py_k \pm 1 = K$, звідки

$$y_k = (K \pm 1) / p. \quad (2.7)$$

Тому що величина y_k повинна бути цілим числом, то число колекторних пластин K не може бути довільним. Необхідно вибирати $y_k = (K - 1) / p$ (неперехрещена обмотка), тому що при цьому зменшується витрата обмотувального проводу. Якірна котушка в

розглянутій обмотці має форму хвилі, тому обмотку називають хвильовою. У якорі барабанного типу напрямок ЕРС зберігається незмінним у всіх сторонах секцій, розташованих у межах однієї полюсної поділки, тобто в $S/2p$ сторонах секцій. В простій хвильовій обмотці при одному обході окружності якоря з'єднують послідовно $2p$ сторін секцій, тому кількість секцій у кожній паралельній гілці $S_a = pS/(2p) = S/2$, а число паралельних гілок обмотки

$$2a = S/S_a = 2. \quad (2.8)$$

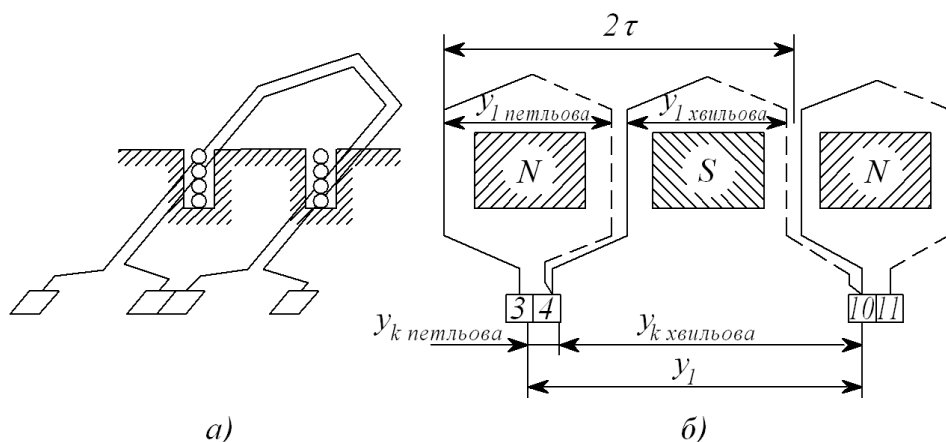
Отже, число паралельних гілок при простій хвильовій обмотці не залежить від числа полюсів і завжди дорівнює двом, тому таку обмотку часто називають послідовною. Зрівняльні з'єднання при простій хвильовій обмотці не потрібні, тому що в кожену паралельну гілку входять секції, сторони яких розташовані під всіма полюсами. У результаті нерівність потоків окремих полюсів не викликає нерівності ЕРС у паралельних гілках. При хвильовій обмотці в машинах малої потужності встановлюють тільки два щіткових пальці; в потужних машинах для зменшення щільності струму під щітками і поліпшення струмознімання зазвичай ставлять повний комплект щіткових пальців.

Двополюсні машини невеликої потужності виконують з простою петльовою обмоткою, тому що при двох полюсах хвильова обмотка перетворюється в петльову. По мірі збільшення потужності переходять до більш компактних чотириполюсних машин, які мають меншу масу, ніж двополюсні. Чотириполюсні машини невеликої і середньої потужності часто мають хвильову обмотку, яка не вимагає застосування зрівняльних з'єднань. При підвищеній напрузі на щітках (до 1000 В і більше) таку обмотку застосовують у чотириполюсних машинах потужністю до 200–300 кВт.

Якщо напруга на колекторі невелика (110 або 220 В), то вже при потужності в десятки кіловат застосовують чотириполюсні машини з петльовою обмоткою для зменшення струму в паралельній гілці. Його значення навіть у досить потужних машинах не повинне перевищувати 250–300 А, тому що при виконанні обмотки із провідників великого перерізу виникають значні технологічні труднощі при виготовленні якірних котушок і їхнього укладання. При простій петльовій обмотці струм $i_a = I_a/2a$, тому зі збільшенням потужності і струму машини для збереження струму i_a в припустимих межах збільшують кількість полюсів.

Складні обмотки

При потужності більше 1000 кВт стає вигідним застосовувати складні багатоходові обмотки якоря. У найпростішому випадку багатоходові обмотки являють собою m простих петльових або хвильових обмоток, накладених на загальний якір і зміщених відносно одна одної. В складній петльовій обмотці число паралельних гілок $2a = 2pt$, а в складній хвильовій – $2a = 2m$, де m – число ходів обмотки. Результуючий крок обмотки і крок по колектору відповідно дорівнюють: $y = y_k \pm m$ та $y = y_k = (K \pm m)/p$. Застосування багатоходових обмоток дозволяє збільшувати число паралельних гілок при незмінному числі полюсів, збільшення кількості яких у ряді випадків неможливо. Однак ці обмотки вимагають складних зрівняльних з'єднань. Крім зрівняльних з'єднань першого роду в складних петльових і хвильових обмотках застосовуються зрівняльні з'єднання другого роду, які зменшують нерівномірність розподілення потенціалу по колектору при неможливості забезпечення однакового контактного з'єднання щіток з усіма простими обмотками у складі складних обмоток. У складних хвильових обмотках застосовують лише зрівнювальні з'єднання другого роду, а в складних петльових – як першого, так і другого роду.



а – секція комбінованої обмотки; б – схема комбінованої обмотки

Рис. 2.16 – Схема з'єднання секцій комбінованої обмотки

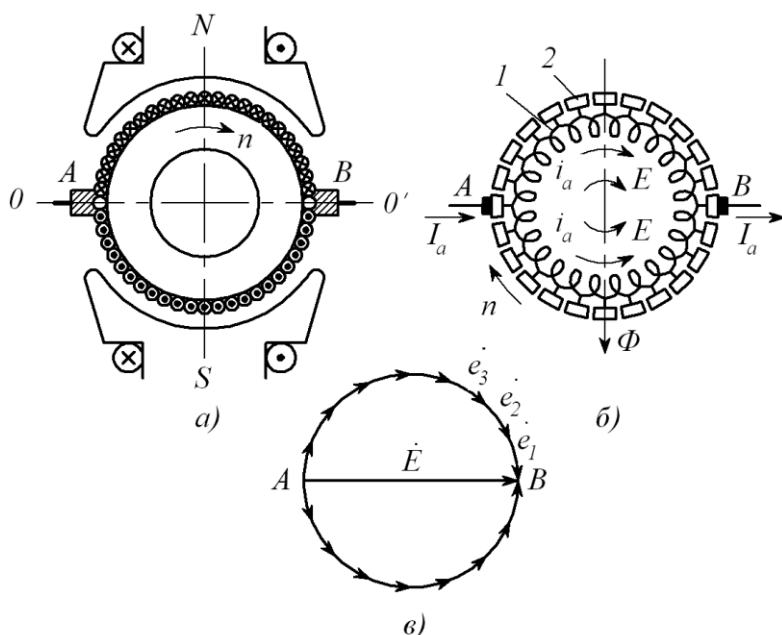
У машинах великої потужності часто використовують паралельно – послідовну обмотку (рис. 2.16), яка є комбінацією простої петльової і багатоходової хвильової обмоток.

Обидві обмотки покладені в ті самі пази і мають загальні колекторні пластини. Щоб зрівняти ЕРС паралельних гілок, утворених петльовою і хвильовою обмотками, число паралельних гілок $2a$ цих обмоток повинне бути однаковим: для цього число ходів m хвильової обмотки повинне дорівнювати p . Секції хвильової і петльової обмоток є одна для одної зрівнювачами, тому комбіновану обмотку виконують без спеціальних зрівняльних з'єднань.

Електрорушійна сила обмотки якоря

При обертанні якоря в провідниках, що знаходяться під протилежними полюсами, індукується ЕРС відповідного напрямку. Провідники, в яких відбувається індукування ЕРС, розташовані по обидві сторони від геометричної нейтралі – осі симетрії, яка розділяє полюси. Обмотка якоря – це гранична кількість витків, підключених до пластин колектора таким чином, щоб між кожною парою сусідніх колекторних пластин було підключено один або декілька елементарних витків (рис. 2.17). На колектор накладають щітки, за допомогою яких обмотка з'єднується із зовнішніми колами. При обертанні якоря між щітками діє постійна за величиною ЕРС, яка дорівнює сумі ЕРС, індукованих у всіх послідовно з'єднаних витках обмотки якоря, які включені між щітками. При подачі від обмотки якоря максимальної напруги в зовнішнє коло, щітки розташовуються на геометричній нейтралі. За рахунок розташування щіток при обертанні якоря ЕРС в зовнішньому колі незмінна за величиною і напрямком. Зменшення пульсацій ЕРС при переході з однієї колекторної пластини на іншу досягають встановленням великої кількості колекторних пластин, кількість яких на паралельну гілку обмотки якоря повинна складати не менше восьми. Якщо замінити реальну несинусоїдальну ЕРС, індуковану в витках обмотки якоря, еквівалентною синусоїдальною, то значення ЕРС можна знайти з векторної діаграми (рис. 2.17). При достатньо великій кількості колекторних пластин і секцій обмотки якоря, ЕРС практично незмінна в часі і дорівнює діаметру окружності, описаної навколо багатокутника ЕРС, індукованих в окремих витках обмотки.

Щітки розділяють обмотку на дві паралельні гілки, в кожній з яких індукується ЕРС і проходять струми. Величина ЕРС на затискачах машини постійного струму визначається ЕРС однієї паралельної гілки.



1 – обмотка якоря; 2 – колектор

Рис. 2.17 – Схема машини постійного струму (а), спрощена схема обмотки якоря (б) і векторна діаграма ЕРС обмотки (в)

Розглядаючи криві розподілення індукції і напруги вздовж окружності якоря (рис. 2.18), можна записати рівняння ЕРС обмотки якоря. Якщо кількість провідників обмотки якоря N , тоді кількість провідників в одній паралельній гілці дорівнює $N/2a$. При значенні полюсної поділки $\tau = \pi D_a / (2p)$, лінійна швидкість

$$v = \frac{\pi D_a n}{60} = \frac{2\pi n}{60}, \quad (2.9)$$

де D_a – діаметр якоря;

n – частота обертання якоря.

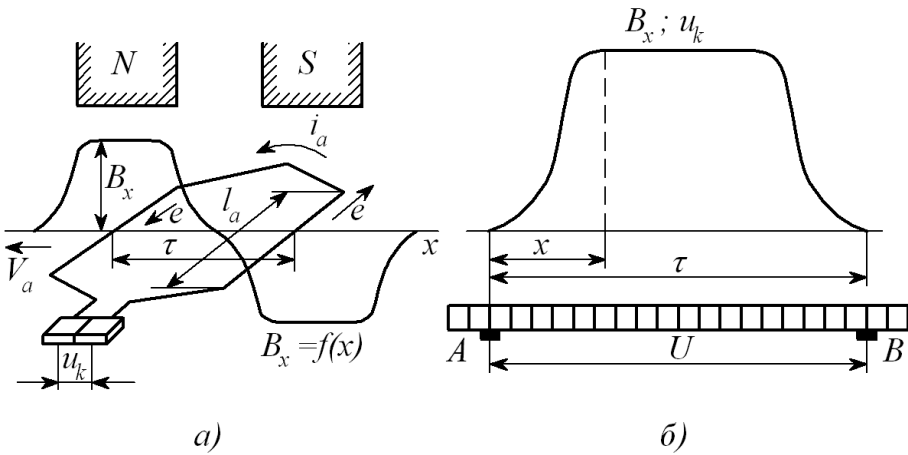


Рис. 2.18 – Криві розподілення індукції вздовж окружності якоря і напруги по колектору

Значення магнітного потоку однієї пари полюсів визначається

$$\Phi = B_{\text{сеп}} l_a \tau, \quad (2.10)$$

де $B_{\text{сеп}}$ – середнє значення магнітної індукції в межах полюсної поділки;

l_a – довжина паралельної гілки.

Після відповідних перетворень ЕРС обмотки якоря

$$E_a = \frac{pN}{60a} n \Phi = C_E n \Phi, \quad (2.11)$$

де $C_E = \frac{pN}{60a} = \text{const}$ – постійна для даної машини величина.

Як видно з (2.11), середнє значення ЕРС обмотки якоря залежить від числа обертів якоря і величини магнітного потоку машини.

2.3 РЕАКЦІЯ ЯКОРЯ

Магнітне поле машини постійного струму під час навантаження

При холостому ході машини постійного струму в ній існує магнітне поле, яке створюється головними полюсами. При роботі машини з навантаженням струм в обмотці якоря створює магнітне поле якоря. Поле якоря, накладаючись на поле головних полюсів, спотворює і зменшує його. Вплив магнітного поля якоря на магнітне поле головних полюсів називається реакцією якоря.

Магнітне поле головних полюсів машини і магнітне поле якоря утворюють результуюче поле. При встановленні щіток на геометричній нейтралі (рис. 2.19), поле якоря направлено поперек осі полюсів, і в даному випадку воно називається полем поперечної реакції якоря.

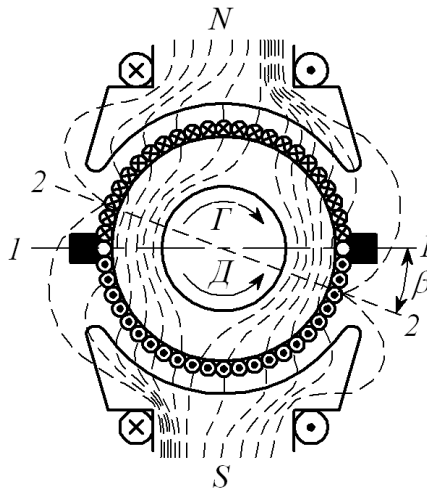


Рис. 2.19 – Результуюче магнітне поле при встановленні щіток на геометричній нейтралі

Поперечна реакція якоря викликає ослаблення поля під одним краєм полюса і його підсилення під іншим, внаслідок чого вісь результуючого поля повертається в генераторі за напрямком обертання якоря, а в двигуні – проти обертання якоря (рис. 2.20). Під дією поперечної реакції якоря нейтральна лінія на поверхні якоря, на

- викривлення результуючого поля машини спричиняє перерозподіл магнітної індукції в повітряному зазорі машини. Це приводить до того, що миттєві значення ЕРС секцій обмотки якоря в моменти проходження їхніх пазових сторін у зоні максимальних значень магнітної індукції різко підвищуються. В результаті зростає напруга між сусідніми колекторними пластинами U_k , що при значних навантаженнях може призвести до перекривання електричною дугою міканітової прокладки між колекторними пластинами. Наявні на колекторі частки графіту будуть сприяти розвитку електричної дуги, що призведе до виникнення потужної електричної дуги, що перекриває весь колектор або значну його частину.

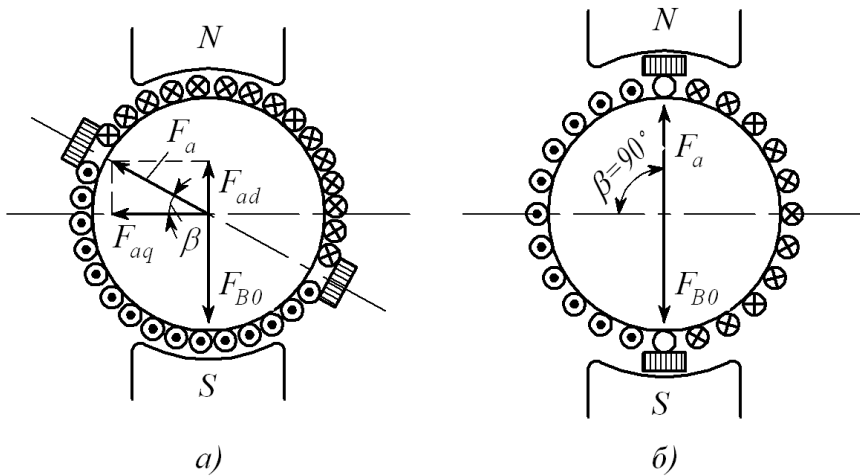


Рис. 2.21 – Складові МРС при зсуві щіток з геометричної нейтралі а) і при утворенні поздовжньої складової МРС б)

При насиченості магнітної системи машини, що має місце в більшості електричних машин, підмагнічування одного краю полюсного наконечника і перебуваючої під ним зубцової зони якоря відбувається в меншому ступені, ніж розмагнічування іншого краю. При цьому розподіл магнітної індукції в проміжку стає більше рівномірним, однак результуючий магнітний потік машини при цьому зменшується. Таким чином, реакція якоря в машині з насиченою магнітною системою розмагнічує машину. В результаті

погіршуються робочі властивості машини: у генераторів знижується ЕРС, у двигунів зменшується обертовий момент.

Вплив реакції якоря на роботу машини збільшується при зсуві щіток з геометричної нейтралі. Це пояснюється тим, що разом із щітками зміщується і вектор МРС якоря. При цьому МРС якоря F_a утворюється поперечною $F_{aq} = F_a \cos \beta$ і поздовжньою складовою $F_{ad} = F_a \sin \beta$, що спрямована по осі полюсів. Якщо машина працює в генераторному режимі, то при зсуві щіток у напрямку обертання якоря поздовжня складова МРС якоря діє зустрічно МРС обмотки збудження F_{B0} , що послаблює основний магнітний потік машини; при зсуві щіток проти обертання якоря поздовжня складова МРС якоря F_{ad} діє узгоджено із МРС F_{B0} , що викликає підмагнічування машини і може бути причиною іскріння на колекторі. Якщо машина працює в режимі двигуна, то при зсуві щіток за напрямком обертання якоря, поздовжня складова МРС якоря F_{ad} підмагнічує машину, а при зсуві щіток проти обертання якоря поздовжня складова F_{ad} розмагнічує машину. Штучне утворення підмагнічуючої дії поздовжньої реакції якоря F_{ad} в машинах загальнопромислового виконання неприпустимо через порушення роботи щіткового контакту.

Зсув щіток з геометричної нейтралі впливає на поперечну складову МРС якоря – величину, що залежить від кута β , з ростом якого вона зменшується ($F_{aq} = F_a \cos \beta$). Таким чином, в машинах постійного струму можливі такі випадки:

- щітки встановлені на геометричній нейтралі і реакція якоря має тільки поперечну складову;
- щітки зміщені з геометричної нейтралі і реакція якоря має дві складові – поперечну і поздовжню;
- щітки розташовані по осі, перпендикулярній геометричній нейтралі, тобто коли $\beta = 90^\circ$, при цьому реакція якоря по поперечній осі відсутня. Однак такий випадок не має практичного застосування, тому що машина стає непрацездатною: в генераторному режимі ЕРС машини дорівнює нулю, тому що в паралельну гілку обмотки входить рівне число секцій із зустрічним напрямком ЕРС, в режимі двигуна електромагнітні сили сторін обмотки якоря, що діють ліворуч і праворуч від осі щіток, рівні і протилежно направлені, а тому обертальний момент не створюється.

Методи зменшення впливу реакції якоря

У зв'язку з тим, що реакція якоря негативно впливає на робочі властивості і характеристики машини постійного струму, при проектуванні машини вживають низку заходів щодо усунення дії реакції якоря або ослаблення її впливу до допустимих меж.

Найбільш ефективним засобом зменшення впливу поперечної складової реакції якоря є застосування в машині компенсаційної обмотки. Компенсаційну обмотку укладають в пази полюсних наконечників (рис. 2.22) і включають послідовно з обмоткою якоря таким чином, щоб МРС компенсаційної обмотки F_k була протилежна за напрямком МРС обмотки якоря F_a . Компенсаційну обмотку виконують розподіленою по поверхні полюсних наконечників всіх головних полюсів машини.

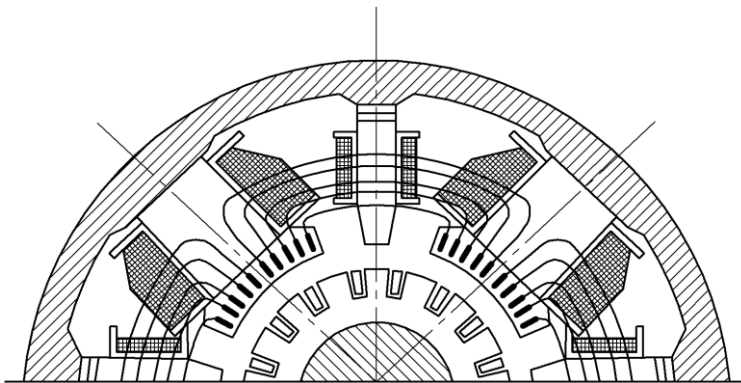


Рис. 2.22 – Компенсаційна обмотка машини постійного струму

Включення компенсаційної обмотки послідовно в коло якоря забезпечує автоматичність компенсації МРС якоря при будь-якому (у межах номінального) навантаженні машини. Таким чином, у машині постійного струму з компенсаційною обмоткою при переході від холостого ходу до режиму навантаження закон розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку залишається практично незмінним. Однак у міжполюсному просторі частина МРС якоря залишається некомпенсованою. Небажаний вплив цієї частини МРС на роботу щіткового контакту компенсують застосуванням в машині додаткових полюсів.

Компенсаційні обмотки застосовують лише в машинах середньої і великої потужності – більше 150–500 кВт при $U_n \geq 440$ В, які працюють із різкими коливаннями навантаження і різкими змінами режиму роботи. Пояснюється це тим, що компенсаційна обмотка здорожчує і ускладнює машину і її застосування в деяких випадках економічно невигідно.

У машинах малої і середньої потужності, в яких не використовується компенсаційна обмотка, шкідливий вплив поперечної складової реакції якоря послабляється відповідним вибором повітряного проміжку під головними полюсами. При цьому слід враховувати, що при досить малому повітряному проміжку і значному струмі якоря, поперечна складова реакції якоря може не тільки послабити магнітне поле під однією з частин головного полюса, але й змінити полярність. Деяке збільшення повітряного проміжку під головними полюсами, особливо на їхніх краях, значно послаблює дію реакції якоря. Однак, при збільшенні повітряного проміжку, виникає необхідність підвищення МРС обмотки головних полюсів, що веде до збільшення розмірів полюсних котушок, полюсів і габаритів машини.

На цьому ж принципі зменшення МРС поперечної складової реакції якоря за рахунок підвищеного магнітного опору на шляху її дії, заснований і інший спосіб послаблення дії реакції якоря. Цей спосіб полягає в тому, що осердя головних полюсів виготовляють з листів анізотропної (холоднокатаної) сталі (сталь марки 3411). За напрямком прокату така сталь має підвищену магнітну проникність, а поперек напрямку прокату – невелику магнітну проникність.

Штамування і збирання полюсів з листів такої сталі виконується таким чином, щоб вісь полюса співпадала з напрямком прокату.

2.4 ЯВИЩЕ КОМУТАЦІЇ В МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Причини і ступені іскріння на колекторі

Процес зміни струму в секціях обмотки якоря при переході з однієї паралельної гілки в іншу називають комутацією. Під комутацією розуміють всі явища і процеси, які відбуваються в щіточному контакті при роботі електричних машин. Якість комутації визначає працездатність машини та її надійність в експлуатації.

Важливо, щоб комутація відбувалася без значного іскріння поблизу контактних поверхонь щіток, оскільки сильне іскріння призводить до пошкодження поверхні колектора і щіток і унеможливорює нормальну довготривалу роботу машини.

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, виступи міканітової ізоляції над колекторними пластинами, нещільне закріплення або вібрація траверси, пальців або щіткотримачів, а також інші причини, що викликають порушення електричного контакту між щіткою і колектором. При цьому можливий короточасний розрив контакту між щіткою і колекторними пластинами і виникнення електричної дуги. Окремо до механічних причин можна віднести велику швидкість колектора – приблизно 50 м/с і вище.

Потенційні причини іскріння з'являються при виникненні перенапруги між сусідніми колекторними пластинами внаслідок дії реакції якоря. У цьому випадку іскріння найбільш небезпечно, тому що воно зазвичай супроводжується появою на колекторі електричної дуги.

Комутаційні причини іскріння створюються фізичними процесами, що відбуваються в машині при переході секцій обмотки якоря з однієї паралельної гілки в іншу. При виході колекторної пластини з-під щітки відбувається короточасний розрив контакту і виникає коротка електрична дуга, яка пошкоджує збігаючі частини щіток і колекторних пластин.

Іскріння, викликане комутаційними або потенційними причинами, призводить до пошкодження поверхонь щіток і колекторних пластин, сприяє виникненню вібрацій і пошкодженню ізоляції колекторних пластин, тобто призводить до виникнення механічних причин. Нестабільність щіточного контакту, обумовлена механічними причинами, в свою чергу суттєво впливає на електричні і магнітні процеси в машині. Тому, як правило, іскріння щіток на колекторі – результат комплексної дії всіх причин.

Якість комутації оцінюється ступенем іскріння – класом комутації – під збігаючою стороною щітки, з-під якої виходять пластини колектора при його обертанні.

Відповідно до стандартів, існують наступні класи комутації – ступені іскріння:

- ступінь “1” – іскріння відсутнє (темна комутація);

- ступінь “ $1\frac{1}{4}$ ” – слабе іскріння під невеликою частиною щітки, відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках;

- ступінь “ $1\frac{1}{2}$ ” – слабе іскріння під більшою частиною щітки, що приводить до появи слідів почорніння на колекторі, які легко усуваються протиранням поверхні колектора бензином, і слідів нагару на щітках;

- ступінь “2” – іскріння під всім краєм щітки. Допускається тільки при короткочасних поштовхах навантаження і при перевантаженні. Приводить до появи слідів почорніння на колекторі, які не усуваються протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках;

- ступінь “3” – значне іскріння під всім краєм щітки з появою великих іскор, які вилітають, що приводить до значного почорніння колектора, яке не усувається протиранням поверхні колектора бензином, а також до підгоряння і 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 зазначений, то при номінальному навантаженні він не повинен перевищувати $1\frac{1}{2}$.

Фізична суть процесу комутації

При обертанні якоря секції його обмотки переходять з однієї паралельної гілки до іншої, внаслідок чого напрям струму в них змінюється (рис. 2.23).

Більшу частину часу струм секції дорівнює струму паралельної

гілки $i_a = \frac{I_a}{2a}$.

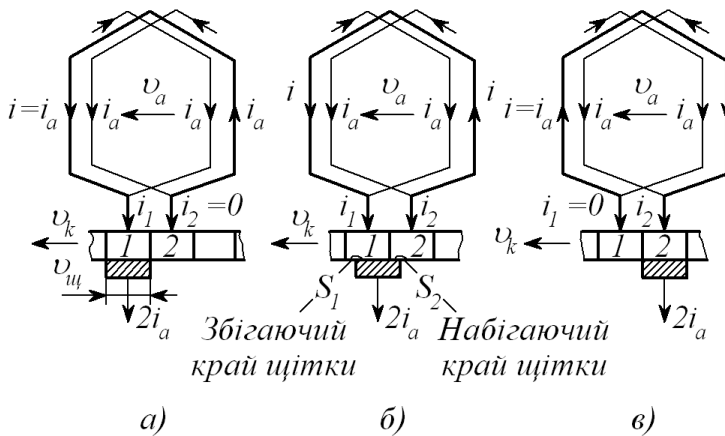


Рис. 2.23 – Схема розподілення струмів в комутуючій секції

Зміна напрямку струму відбувається за час T_k , протягом якого з'єднані з секцією колекторні пластини контактують із щіткою. Цей час, протягом якого секція замкнена накоротко щіткою, називається періодом комутації. Період комутації

$$T_k = \frac{b_{щ}}{v_k}, \quad (2.12)$$

де $b_{щ}$ – ширина щітки;

v_k – швидкість колектора.

В сучасних машинах $T_k = 0,001...0,0001$ с, внаслідок чого середня швидкість зміни струму в секції $\left(\frac{di}{dt}\right)_{сеп} = \frac{2i_a}{T_k}$ дуже велика. В секції індукуються велика ЕРС само- і взаємоіндукції, яка називається реактивною ЕРС

$$e_p = -L_{pez} \frac{di}{dt}, \quad (2.13)$$

де L_{pez} – результуюча індуктивність секції обмотки.

Реактивна ЕРС перешкоджає зміні струму – “загальмовує” його. Крім реактивної ЕРС в секції також індукуються ЕРС обертання, яка утворюється зовнішнім магнітним полем і називається комутуючою

$$e_k = 2B_k l_a v_a W_c, \quad (2.14)$$

де B_k – індукція в повітряному проміжку в зоні руху комутуючої секції;

W_c – кількість витків комутуючої секції.

Фізичний процес комутації при припущенні, що ширина щітки дорівнює ширині колекторної пластини, проходить в три основні етапи (рисунк 2.23). В перший момент часу (рис. 2.23, а) струм i в комутуючій секції, приєднаної до пластин 1 і 2, дорівнює i_a і направлений від пластини 2 до пластини 1. Струм щітки $2i_a$ проходить через пластину 1, тобто $i_1 = 2i_a$ і $i_2 = 0$. В проміжному положенні (рис. 2.23, б) одна частина струму щітки $2i_a$ проходить через пластину 1, а друга частина – через пластину 2, причому $i_1 + i_2 = 2i_a$. В кінці процесу комутації (рис. 2.23, в) пластина 1 виходить з-під щітки, і струм, що проходить по ній, стає рівним нулю. При цьому струм щітки $2i_a$ проходить через пластину 2, тобто $i_2 = 2i_a$ і $i_1 = 0$, а струм i в секції змінює свій напрям порівняно зі струмом в початковий момент комутації. Для розглянутого контура комутуючої секції можна скласти рівняння

$$e_p + e_k = i_1 R_1 + i R_c - i_2 R_2, \quad (2.15)$$

де i_1 і i_2 – миттєві значення струмів колекторних пластин;

i – струм в комутуючій секції;

R_1 і R_2 – опори перехідних контурів між щіткою і колекторними пластинами;

R_c – опір секції.

Оскільки опір секції завжди значно менший опорів щітчного контакту, то він суттєво не впливає на процес комутації і його значенням можна знехтувати. Тоді отримуємо основне рівняння комутації

$$e_p + e_k = i_1 R_1 - i_2 R_2. \quad (2.16)$$

Основне рівняння комутації – нелінійне диференціальне рівняння із змінними коефіцієнтами, аналітичне рішення якого можна отримати при різних спрощуючих припущеннях.

Прямолінійна і криволінійна комутація

Прямолінійний вид комутації має місце в машині, якщо в процесі комутації в комутуючій секції ЕРС не наводиться або, що більш реально, сума ЕРС у комутуючій секції дорівнює нулю. У цьому випадку для комутуючої секції, замкнутою щіткою, згідно із другим законом Кірхгофа можна записати

$$i_1 R_1 - i_2 R_2 = 0. \quad (2.17)$$

Оскільки

$$i_1 = i_a + i; \quad i_2 = i_a - i. \quad (2.18)$$

Одержимо

$$(i_a + i)R_1 - (i_a - i)R_2 = 0.$$

звідки струм у комутуючій секції

$$i = i_a (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1). \quad (2.19)$$

Закон зміни струму комутуючій секції у функції часу визначається рівнянням

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right). \quad (2.20)$$

Це рівняння є лінійним, а тому графік $i = f(t)$ – це пряма лінія, що перетинає вісь абсцис у точці $t = 0,5T_k$ (рис. 2.24). Комутація, при якій струм у комутуючій секції змінюється за прямолінійним законом, називають прямолінійною (ідеальною) комутацією.

Досить важливим фактором, що визначає якість комутації, є щільність струму в перехідному контакті “щітка–пластина”: j_1 – щільність струму під збігаючим краєм щітки; j_2 – щільність струму під набігаючим краєм щітки.

Щільність струму під щіткою прямо пропорційна тангенсу кута між віссю абсцис і графіком комутації, тобто $j_1 \equiv \operatorname{tg} \alpha_1$ і $j_2 \equiv \operatorname{tg} \alpha_2$. Графік прямолінійної (ідеальної) комутації має вигляд прямої лінії. При цьому $\alpha_1 = \alpha_2$, а отже, щільність струму в перехідному контакті

“щітка-колектор” протягом всього періоду комутації залишається незмінною ($j_1 = j_2 = \text{const}$).

Фізично це пояснюється тим, що при прямолінійній комутації зменшення струму, що проходить через збігаючу пластину колектора, пропорційне зменшенню площі контакту щітки із цією пластиною, а наростання струму через набігаючу пластину пропорційно збільшенню площі контакту щітки із цією пластиною.

На рисунку 2.24, видно, що до моменту часу, коли щітка втрачає контакт із збігаючою пластиною, струм через цю пластину зменшується до нуля. Таким чином, при прямолінійній комутації пластина колектора виходить з-під щітки без розриву струму. Викладені властивості прямолінійної (ідеальної) комутації – сталість щільності струму під щіткою й вихід пластини з-під щітки без розриву струму – є основними, і завдяки їм цей вид комутації не супроводжується іскрінням на колекторі.

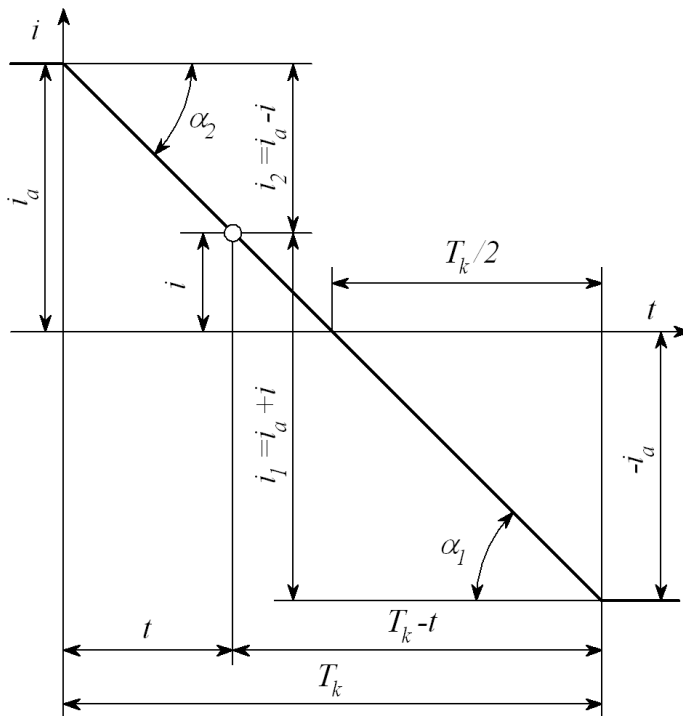


Рис. 2.24 – Графік струму прямолінійної комутації

У випадку криволінійної комутації при відсутності додаткових полюсів ЕРС обертання спрямована згідно з реактивною ЕРС. У цьому випадку в контурі комутуючої секції діє сума ЕРС

$$\sum e = e_p + e_k. \quad (2.21)$$

Значення струму в комутуючій секції при криволінійній уповільненій комутації з урахуванням основного закону комутації

$$i = [i_a(R_2 - R_1)/(R_2 + R_1)] + [\sum e/(R_2 + R_1)]. \quad (2.22)$$

Перша складова правої частини отриманого виразу визначає струм прямолінійної комутації, друга складова правої частини виразу (2.22) визначає значення додаткового струму комутації, що виникає в контурі комутуючої секції під дією ЕРС

$$i_o = [\sum e/(R_2 + R_1)]$$

Таким чином, струм у комутуючій секції при криволінійній уповільненій комутації дорівнює сумі двох складових

$$i = i_{np} + i_o. \quad (2.23)$$

Характер зміни струму i_{np} визначається графіком, наведеним на рисунку 2.24. Для визначення характеру зміни додаткового струму комутації i_o за період комутації необхідно попередньо з'ясувати, як змінюються за період комутації величини, що визначають цей струм, а саме ЕРС $\sum e$ і сума опорів $(R_2 + R_1)$.

Якщо в машині немає додаткових полюсів і магнітна індукція в зоні комутації B_k невелика, то ЕРС $\sum e$ визначається головним чином реактивною ЕРС e_p . При прямолінійному законі зміни струму

$$\frac{di}{dt} = \text{const} \text{ і } \sum e = \text{const}.$$

Закон зміни суми опорів $(R_2 + R_1)$ визначається виразом

$$R_2 + R_1 = \frac{R_{S_k}}{v_k i} \left(\frac{1}{T_k - t} + \frac{1}{t} \right) = R \left(\frac{T_k}{T_k - t} + \frac{T_k}{t} \right), \quad (2.24)$$

де R – опір перехідного контакту “щітка–пластина”, коли пластина колектора повністю перекрита щіткою і площа її перехідного контакту дорівнює S_k .

На початку ($t = 0$) і наприкінці ($t = T_k$) комутації $R_2 + R_1 = \infty$; при $t = 0,5T_k$ сума опорів $R_2 + R_1 = 4R$. На рисунку 2.25, а представлений графік $(R_2 + R_1) = f(t)$. Цьому закону зміни суми опорів і сталості ЕРС $\sum e$ відповідає крива 1 зміни додаткового струму комутації $i_\delta = f(t)$, представлена на рисунку 2.25, б

Графік зміни результуючого струму комутації, отриманий додаванням ординат графіків струму прямолінійної комутації (рис. 2.24) і додаткового струму комутації (рис. 2.25, крива 1), представлений на рисунку 2.26. Криволінійний вид цього графіка обумовлений криволінійністю графіка $i_\delta = f(t)$. Фізично це пояснюється реактивною дією сумарної ЕРС, що наводиться в комутуючій секції та перешкоджає змінам струму в цій секції від $+i_a$ на початку комутації до $-i_a$ в кінці. Із цієї причини в середині періоду комутації (точка а) струм у комутуючій секції $i_a = i_\delta$ не дорівнює нулю, як це мало місце при прямолінійній комутації, а дорівнює додатковому струму комутації i_δ , який у цей момент часу ($t = 0,5T_k$) має найбільше значення.

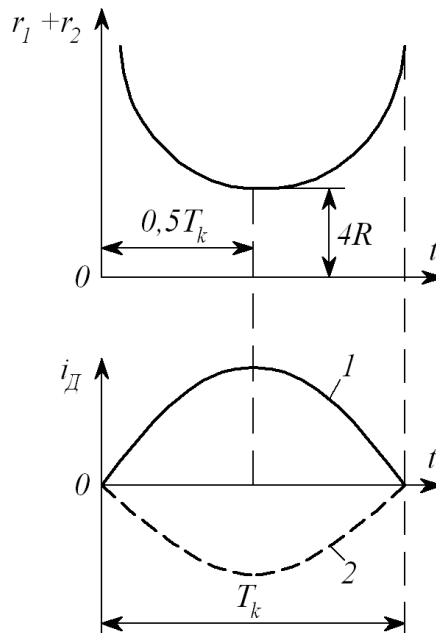


Рис.2.25 – Графіки змін опорів $(R_2 + R_1)$ і струму i_δ

Зменшення струму i_a до нуля і зміна його напрямку настають у другій половині періоду комутації в момент часу $t \geq 0,5T_k$, тобто в порівнянні із прямолінійною комутацією процес зміни напрямку струму в комутуючій секції затягується в часі. У підсумку графік комутації набуває криволінійного вигляду. Із цієї причини таку комутацію називають криволінійною вповільненою. Характерна ознака цього виду комутації – неоднакова щільність струму під щіткою на початку і наприкінці періоду комутації.

Середнє значення щільності струму під набігаючим краєм щітки j_2 , що має контакт із пластиною 2, менше середнього значення щільності струму j_1 під збігаючим краєм щітки, що має контакт із пластиною 1 (рис. 2.27). З одного боку, це пояснюється тим, що $\operatorname{tg} \alpha_2 \leq \operatorname{tg} \alpha_1$ (рис. 2.26), а з іншого боку тим, що при $t = 0,5T_k$ струми, що відходять в обмотку якоря через пластини 1 і 2, не рівні: $i_2 \leq i_1$. При криволінійній уповільненій комутації площа S_1 зіткнення пластини 1 із щіткою зменшується швидше, ніж струм $i_1 = i_a + i_d$, а тому щільність струму під збігаючим краєм щітки підвищується. До кінця періоду комутації ця щільність струму досягає найбільшого значення $j \equiv \operatorname{tg} \alpha'_1$, де α'_1 відповідає $t \approx T_k$ (рис. 2.26).

При значних навантаженнях машини щільність струму під збігаючим краєм щітки може досягти неприпустимо великих значень і викликати іскріння на колекторі. Однак, як показує досвід, можлива поява іскріння й при невеликих навантажувальних струмах у колі якоря. Це свідчить про те, що збільшення щільності струму під збігаючим краєм щітки не єдина причина іскріння на колекторі. Іскріння виникає також при розмиканні замкнутого накоротко щіткою кола комутуючої секції при виході збігаючої пластини колектора з-під щітки. У момент розмикання комутуючої секції з додатковим струмом комутації накопичена в ній енергія магнітного поля витрачається на створення електричної дуги між збігаючим краєм щітки і збігаючою колекторною пластиною.

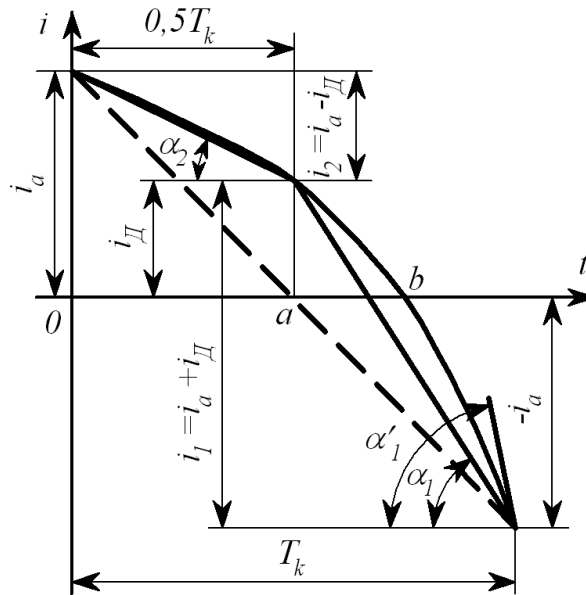


Рис. 2.26 – Графік струму криволінійної уповільненої комутації

Викладені вище властивості криволінійної уповільненої комутації – підвищення щільності струму під збігаючим краєм щітки і вихід збігаючої пластини з-під щітки з розривом кола струму комутації – створюють умови до виникнення іскріння на колекторі під збігаючими краями щіток.

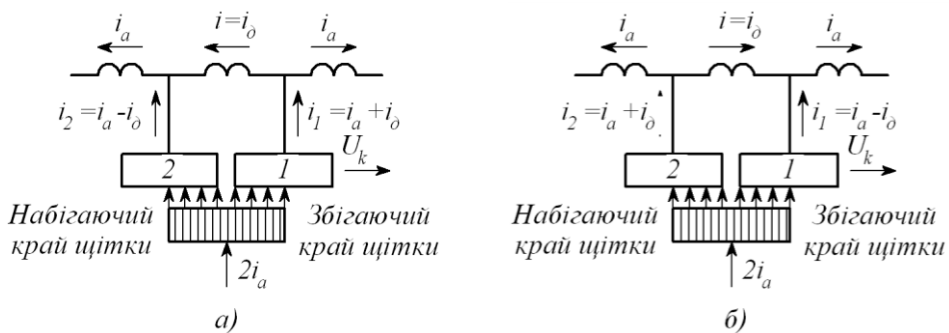


Рис. 2.27 – Розподіл щільності струму під щіткою при криволінійній уповільненій (а) і прискореній (б) видах комутації

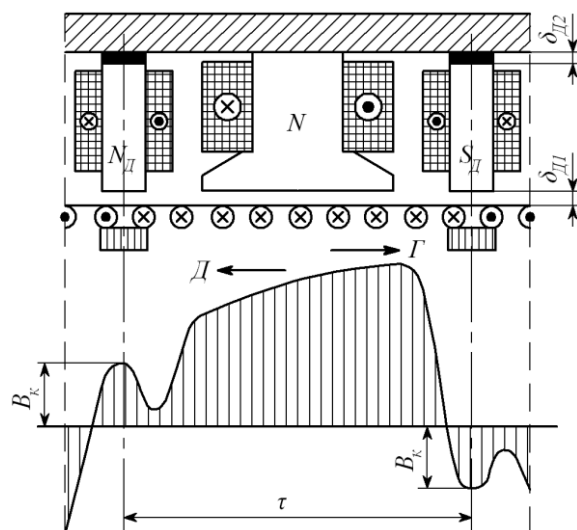


Рис. 2.28 – Результуюче магнітне поле в повітряному проміжку машини з додатковими полюсами в генераторному режимі (Г) і режимі двигуна (Д)

Ще один вид криволінійної комутації спостерігається при встановленні додаткових полюсів, що призводить до збільшення ЕРС e_k , яка стає більше реактивної ЕРС e_p (рис. 2.28).

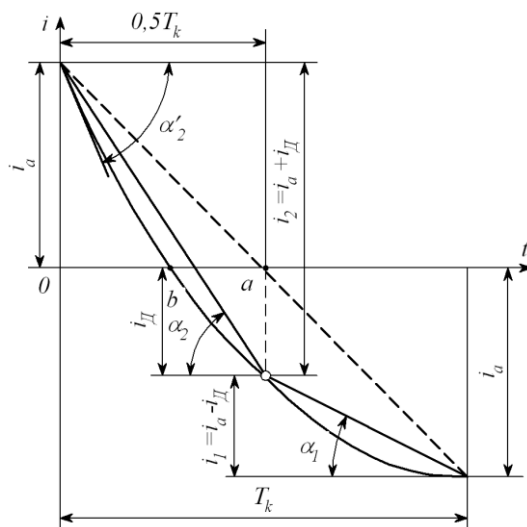


Рис. 2.29 – Графік струму криволінійної прискореної комутації

У цьому випадку сумарна ЕРС $\sum e$ змінить свій знак, а додатковий струм комутації – свій напрямок на протилежний в порівнянні з тим, який він мав при криволінійній уповільненій комутації (рис. 2.25, крива 2).

Графік зміни результуючого струму комутації $i_2 = i_a + i_o$ у цьому випадку набуває вигляду, представленого на рисунку 2.29, тобто комутація стає криволінійною прискореною, тому що струм у комутуючій секції досягає нульового значення за час $t \leq 0,5T_k$. Для криволінійної прискореної комутації характерне підвищення щільності струму під набігаючим краєм щітки (рис. 2.27, б). Пояснюється це тим, що при цьому виді комутації площа зіткнення пластини 2 із щіткою наростає повільніше, ніж збільшується струм $i_2 = i_a + i_o$. Найбільше значення щільності струму $j'_2 \equiv tg \alpha'_2$ відповідає початку періоду комутації ($t \approx 0$). При значних навантаженнях це може привести до іскріння під набігаючим краєм щітки. Це пояснюється тим, що при прискореній комутації вихід пластини, що збігає, з-під щітки відбувається з розривом кола додаткового струму комутації, що має напрямок, протилежний струму уповільненої комутації.

Способи поліпшення комутації

Основною причиною незадовільної комутації в машинах постійного струму є додатковий струм комутації

$$i_o = \frac{\sum e}{R} \quad (2.25)$$

Опір перехідного контакту “щітка–пластина” R включає в себе опір щітки і перехідного контакту.

З отриманого виразу (2.25) можна зробити висновок, що для зменшення струму i_o , а отже, поліпшення комутації, необхідно збільшувати опір R або зменшувати сумарну ЕРС $\sum e$ у комутуючій секції. Звідси впливає ряд способів поліпшення комутації, основні з яких розглянуті нижче.

З погляду забезпечення задовільної комутації доцільніше застосовувати щітки із збільшеним перехідним падінням напруги в перехідному контакті і відповідно у щітці, тобто використовувати щітки із збільшеним опором. 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 і додаткової витрати міді. Тому щітки із збільшеним опором застосовують переважно в машинах з відносно високою номінальною напругою, а отже, і з невеликим робочим струмом.

Щітки для електричних машин розділяють на чотири групи, що розрізняються складом, способом виготовлення і характеристиками: графітні, електрографітовані, вугільно-графітні, мідно-графітні. Вибирають щітки відповідно до рекомендацій, вироблених на підставі багаторічного досвіду проектування і експлуатації електричних машин. Найбільше застосування в машинах постійного струму напругою 110–440 В отримали електрографітовані щітки з падінням напруги 2,4–3,5 В на пару щіток.

Збільшенню перехідного опору щіткового контакту, а отже, поліпшенню комутації, сприяє політура колектора – тонка оксидна плівка на поверхні колектора, що має підвищений електричний опір.

Суттєво впливає на сумарну ЕРС у комутуючій секції реактивна ЕРС e_p . Величина реактивної ЕРС в значній мірі залежить від ширини щітки: чим ширше щітка, тим більше число колекторних пластин перекриває вона одночасно, а отже, тим більше секцій одночасно комутується, що викликає підвищення реактивної ЕРС. Зменшення значення реактивної ЕРС за рахунок використання вузьких щіток також небажано через недостатню механічну міцність, а також тому, що для створення необхідної площі контактної поверхні при використанні вузьких щіток необхідно збільшувати їх довжину, а це призводить до необхідності збільшення довжини колектора. Найбільш доцільні щітки шириною в 2–3 колекторні пластини.

Помітно впливає на реактивну ЕРС застосування того чи іншого типу обмотки якоря. Так, якщо обмотку якоря виконати з кроком меншим, ніж полюсна поділлка (укорочена обмотка), то активні сторони одночасно комутуючих секцій виявляться в різних пазах, що буде сприяти зменшенню ЕРС. Реактивна ЕРС може бути ослаблена зменшенням індуктивності секцій $L_{рез}$. Для цього використовують одновиткові секції, закладені в неглибокі пази. Однак здійснення багатьох заходів привело б до створення громіздких і неекономічних

машин. Тому при проектуванні машин постійного струму вибір зазначених параметрів пов'язують із прагненням одержати компактну й економічну машину. При цьому реактивна ЕРС може бути в значній мірі зменшена або навіть повністю усунута створенням у зоні комутації (по осі щіток) комутуючого поля певної полярності і величини. Створюється таке поле додатковими полюсами або зрушенням щіток з геометричної нейтралі.

Призначення додаткових полюсів – створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і напрямку, щоб комутуюча ЕРС e_k , що наводиться цим полем, компенсувала реактивну ЕРС e_p . В машині постійного струму без застосування заходів по поліпшенню комутації, комутуюча і реактивна ЕРС спрямовані в одну сторону, тобто діють узгоджено.

Сумарна ЕРС у комутуючій секції $\sum e$ буде дорівнювати нулю, якщо за допомогою додаткових полюсів створити в зоні комутації магнітне поле з магнітною індукцією B_k такої величини і напрямку, щоб ЕРС взаємно компенсувалися, тоді комутація стане прямолінійною (ідеальною). 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 струму якоря i_a , тобто пропорційно МРС якоря F_a .

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 і при заданій потужності отримати машину менших масогабаритних показників. Полярність додаткових полюсів залежить від напрямку обертання і режиму роботи машини. В генераторному режимі полярність додаткового полюса повинна бути такою самою як і у наступного за нею за напрямом обертання головного полюса, в режимі двигуна – як у попереднього за напрямом обертання головного полюса.

Число витків обмотки додаткових полюсів вибирають таким, щоб МРС додаткових полюсів компенсувала МРС якоря по поперечній осі в зоні комутації і мала деякий надлишок, необхідний

для створення комутуючого поля з індукцією B_k , спрямованого протилежно полю реакції якоря (рис. 2.28). Якщо машина обладнана компенсаційною обмоткою, то МРС додаткових полюсів зменшують на величину МРС компенсаційної обмотки. Зазвичай, в компенсованих машинах постійного струму МРС додаткових полюсів на 15–30 % більше МРС якоря.

Додаткові полюси забезпечують задовільну комутацію в машині тільки в межах номінального навантаження.

При перевантаженні машини відбувається насичення магнітного кола додаткових полюсів. У цьому випадку реактивна ЕРС змінюється пропорційно струму навантаження, а зростання ЕРС зовнішнього поля через насичення магнітного кола зменшується, у результаті чого в комутуючій секції з'являється сумарна ЕРС $\sum e$, тобто комутація стає уповільненою. Насиченню осердя додаткових полюсів сприяє магнітний потік розсіювання, що замикається через осердя сусідніх головних полюсів і станину. З метою зменшення магнітного потоку розсіювання і забезпечення більш лінійної залежності потоку додаткових полюсів від струму навантаження, повітряний проміжок додаткового полюса δ_o розділяють на два: один — між осердям полюса і якорем δ_{o1} , а інший — між осердям полюса і станиною δ_{o2} (рис. 2.28). У цьому випадку проміжок δ_{o2} обмежить значення потоку розсіювання. Даний проміжок створюється пакетом немагнітних прокладок, що закладаються між осердям полюса і станиною.

У машинах постійного струму потужністю до 1 кВт, що виготовляються без додаткових полюсів, комутуюче поле в зоні комутації створюється зсувом щіток з геометричної нейтралі. Якщо щітки встановлені на геометричній нейтралі, то поперечне магнітне поле якоря наводить в комутуючих секціях комутаційну ЕРС, спрямовану узгоджено з реактивною, і сприяє уповільненій комутації. При зрушенні щіток на фізичну нейтраль комутуюче поле зникає і комутаційна ЕРС дорівнює нулю. При цьому в комутуючих секціях наводиться лише реактивна ЕРС. Якщо щітки зрушити за фізичну нейтраль, то комутуюче поле змінить свій напрямок щодо напрямку при положенні щіток на геометричній нейтралі. Це поле буде наводити в комутуючих секціях комутаційну ЕРС, що дорівнює реактивній ЕРС, і протилежну їй за напрямком, тобто реактивна ЕРС буде скомпенсована і комутація стане прямолінійною (ідеальною). Для

одержання необхідного ефекту щітки необхідно зміщати в напрямку обертання якоря в генераторах або проти обертання якоря у двигунах.

Описаний спосіб поліпшення комутації має наступні недоліки:

- комутуюче поле змінюється непропорційно навантаженню машини, що виключає повну компенсацію реактивної ЕРС у всьому діапазоні навантажень, тому що для цього необхідно при кожній зміні навантаження міняти положення щіток (зазвичай щітки встановлюють у фіксоване положення, що відповідає повній компенсації реактивної ЕРС при номінальному навантаженні);

- при зсуві щіток з геометричної нейтралі підсилюється розмагнічувальна дія реакції якоря;

- для реверсивних машин зсув щіток з геометричної нейтралі неприпустимий, тому що необхідний напрямок зсуву фізичної нейтралі змінюється зі зміною напрямку обертання якоря.

При значних перевантаженнях або раптовому короткому замиканні машини постійного струму комутація стає різко уповільненою. У цьому випадку між збігаючою колекторною пластиною і збігаючим краєм щітки виникає електрична дуга (рис. 2.30).

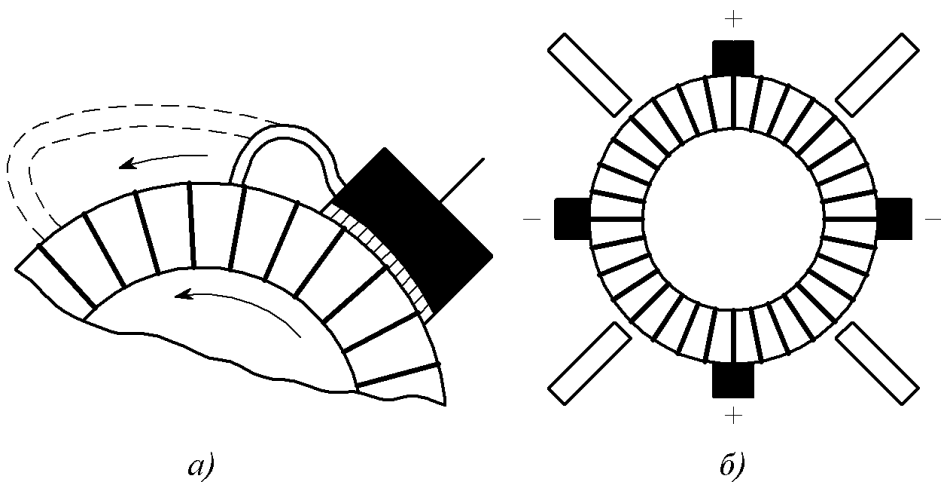


Рис. 2.30 – Розтягання електричної дуги на обертовому колекторі (а) і розташування між щітками (б)

Оскільки колектор обертається, то дуга механічно розтягується. Поряд із цим, перевантаження машини супроводжується посиленням

реакції якоря, під дією якої розподіл індукції в повітряному проміжку машини стає нерівномірним. В 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 і колекторними пластинами в міру їхнього віддалення від збігаючого краю щітки. Все це створює умови для виникнення електричної дуги між щіткою і колекторними пластинами.

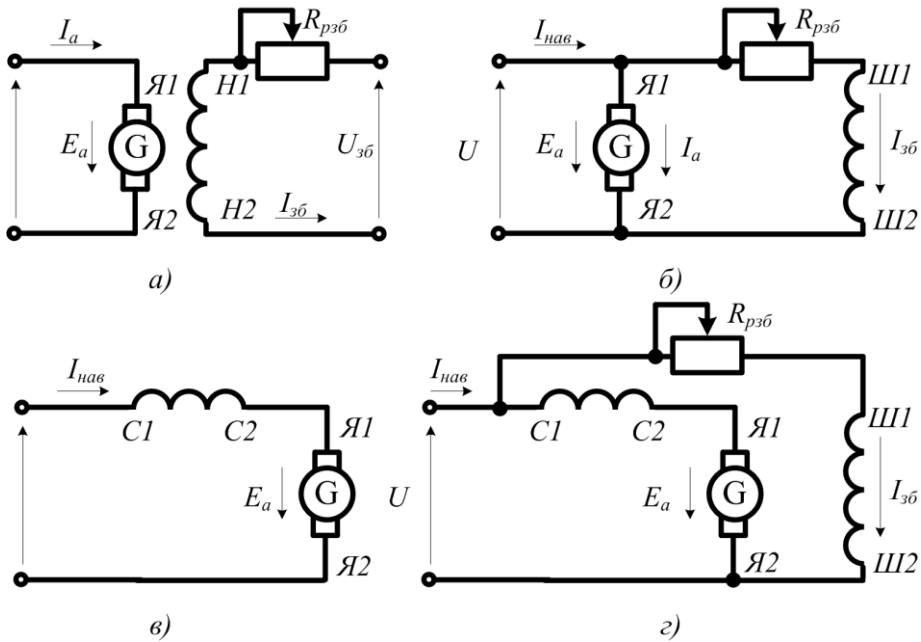
Таким чином, в умовах значного перевантаження в машині постійного струму з'являються комутаційні і потенційні причини для виникнення електричної дуги на колекторі. При цьому електричні дуги, викликані комутаційними причинами, зливаються з дугами, викликаними потенційними причинами, утворюючи навколо колектора потужну електричну дугу, що може перекинутися також і на корпус машини. Описане явище називається коловим вогнем по колектору. Коловий вогонь дуже небезпечний, тому що може привести до серйозної аварії машини, включаючи виникнення в машині пожежі.

Додаткові полюси і компенсаційна обмотка зменшують 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 і обмоткою на якорі встановлюють ізолюючий екран. Для гасіння дуги застосовують повітряне дуття. Для створення перешкоди на шляху поширення дуги між щітками різної полярності встановлюють бар'єри з ізоляційного матеріалу.

2.5 ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Системи збудження машин постійного струму

Характеристики і властивості генераторів постійного струму визначаються в основному способом живлення обмотки збудження.



Я1-Я2 – обмотка якоря; Н1-Н2 – обмотка незалежного збудження; Ш1-Ш2 – обмотка паралельного збудження; С1-С2 – обмотка послідовного збудження

Рис. 2.31 – схема генератора постійного струму незалежного а), паралельного б), послідовного в) і змішаного збудження г)

За способом живлення обмотки збудження розрізняють наступні типи генераторів постійного струму:

- з незалежним збудженням – обмотка збудження отримує живлення від стороннього джерела постійного струму;
- з паралельним збудженням – обмотка збудження (шунтова обмотка) підключена до обмотки якоря паралельно навантаженню;

- з послідовним збудженням – обмотка збудження (серієсна обмотка) підключена послідовно з обмоткою якоря і навантаженням;
- зі змішаним збудженням – використовуються дві обмотки збудження: одна підключається паралельно навантаженню (шунтова обмотка), друга (серієсна обмотка) – послідовно з навантаженням.

Генератори різних типів збудження (рис. 2.31) мають однакову будову і відрізняються лише виконанням обмотки збудження.

Обмотки незалежного і паралельного збудження виготовляються з великою кількістю витків з обмотувального проводу малого перерізу, обмотки послідовного збудження виготовляються з невеликої кількості витків з обмотувального проводу великого перерізу. Генератори малої потужності іноді виготовляються з постійними магнітами. Характеристики таких генераторів наближені до характеристик генераторів з незалежним збудженням.

Основні поняття і відомості

В процесі роботи генератора постійного струму в обмотці якоря індукуються 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:

$$U = E_a - I_a \sum R. \quad (2.26)$$

Сумарний опір кола якоря генератора включає

$$\sum R = R_a + R_{\partial n} + R_{\kappa o} + R_c + R_{\psi}. \quad (2.27)$$

Сума опорів всіх ділянок кола якоря: обмотки якоря R_a , обмотки додаткових полюсів $R_{\partial n}$, компенсаційної обмотки $R_{\kappa o}$, послідовної (серієсної) обмотки збудження R_c і перехідного щіткового контакту R_{ψ} .

При відсутності в машині яких-небудь із зазначених обмоток в (2.27) не входять відповідні складові.

Якір генератора приводиться в обертання приводним двигуном, який створює на валу генератора обертальний 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 гальмівними моментами, що виникають у

генераторі при його роботі в режимі х.х.: моментами від сил тертя і вихрових струмів у якорі.

При роботі навантаженого генератора в проводах обмотки якоря з'являється струм, який, взаємодіючи з магнітним полем збудження, створює на якорі електромагнітний момент M . У генераторі цей момент спрямований зустрічно обертальному моменту приводного двигуна, тобто він є навантажувальним (гальмівним).

При незмінній частоті обертання ($n = const$) обертальний момент приводного двигуна M_1 врівноважується сумою протидіючих моментів: моментом х.х. M_0 і електромагнітним моментом M , тобто

$$M_1 = M_0 + M. \quad (2.28)$$

Вираз (2.28) – рівняння моментів для генератора при $n = const$. Помноживши члени рівняння (2.28) на кутову швидкість обертання якоря Ω , одержимо рівняння потужностей:

$$P_1 = P_0 + P_{em}, \quad (2.29)$$

де $P_1 = M_1 \Omega$ – механічна потужність, спрямована від приводного двигуна до генератора;

$P_0 = M_0 \Omega$ – потужність х.х., тобто потужність, спрямована до генератора в режимі х.х. (при відключеному навантаженні);

$P_{em} = M \Omega$ – електромагнітна потужність генератора.

Електромагнітна потужність

$$P_{эм} = E_a I_a, \quad (2.30)$$

або з урахуванням (2.26)

$$P_{em} = U I_a + I_a^2 \sum R = P_2 + P_{ea}, \quad (2.31)$$

де P_2 – корисна потужність генератора (електрична), тобто потужність, що віддається генератором навантаженню;

P_{ea} – потужність втрат на нагрівання обмоток і щіткового контакту в колі якоря.

З урахуванням втрат на збудження генератора P_{ezb} , отримуємо рівняння потужностей для генератора постійного струму:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{ea} + P_{ezb}. \quad (2.32)$$

Отже, механічна потужність, що розвивається приводним двигуном P_1 , перетворюється в генераторі в корисну електричну потужність P_2 , що передається навантаженню, і потужність, що витрачається на покриття втрат ($P_0 + P_{ea} + P_{ezb}$).

Тому що генератори зазвичай працюють при незмінній частоті обертання, то їх характеристики розглядають за умови $n = \text{const}$. До основних характеристик генераторів постійного струму відносяться:

- характеристика холостого ходу – залежність напруги на виході генератора в режимі х.х. U_0 від струму збудження $I_{зб}$:

$$U_0 = f(I_{зб}) \text{ при } I_{зб} = 0 \text{ і } n = \text{const};$$

- навантажувальна характеристика – залежність напруги на виході генератора U при роботі з навантаженням від струму збудження $I_{зб}$:

$$U = f(I_{зб}) \text{ при } I \neq 0 \text{ і } n = \text{const};$$

- зовнішня характеристика – залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження I :

$$U = f(I_{нав}) \text{ при } R_{пзб} = \text{const і } n = \text{const},$$

де $R_{пзб}$ – регулювальний опір у колі обмотки збудження;

- регулювальна характеристика – залежність струму збудження $I_{зб}$ від струму навантаження $I_{нав}$ при незмінній напрузі на виході генератора:

$$I_{зб} = f(I_{нав}) \text{ при } U = \text{const і } n = \text{const}.$$

Вид перерахованих характеристик визначає робочі властивості і якості генераторів постійного струму.

Генератор незалежного збудження

Схема включення генератора незалежного збудження наведена на рисунку 2.31, а. Реостат $R_{пзб}$, включений в коло збудження, дає можливість регулювати струм $I_{зб}$ в обмотці збудження, а отже, і основний магнітний потік машини. Обмотка збудження живиться від джерела енергії постійного струму: акумулятора, випрямляча або ж іншого генератора постійного струму, який в цьому випадку називається збуджувачем.

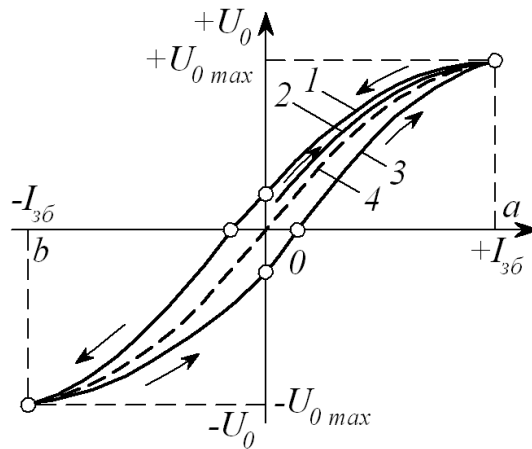


Рис. 2.32 – Характеристики холостого ходу генератора постійного струму незалежного збудження

Характеристика холостого ходу. При знятті характеристики $U_0 = f(I_{зб})$ генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$). Установивши номінальну частоту обертання і підтримуючи її незмінною, поступово збільшують струм в обмотці збудження $I_{зб}$ від нульового значення до $+I_B$, при якому напруга х.х. складає $U_0 = 1,15...1,25U_{ном}$. Одержують дані для побудови кривої 1 (рис. 2.32). Початкова ордината кривої 1 не дорівнює нулю, що пояснюється дією невеликого магнітного потоку залишкового магнетизму, що зберігся від попереднього намагнічування машини. Зменшивши струм збудження до нуля і змінивши його напрямком, поступово збільшують струм у колі збудження до $-I_{зб}$. Отримана в такий спосіб крива 2 називається спадною гілкою характеристики. У першому квадранті крива 2 розташовується вище кривої 1. Пояснюється це тим, що в процесі зняття кривої 1 відбулося збільшення магнітного потоку залишкового магнетизму. Далі дослід проводять у зворотному напрямку, тобто зменшують струм збудження від $-I_{зб}$ до $I_{зб} = 0$, а потім збільшують його до значення $+I_{зб}$. В результаті одержують криву 3, яка називається висхідною гілкою характеристики х.х. Спадна і висхідна гілки характеристики х.х. утворять петлю намагнічування (гистерезису). Провівши між кривими 2 і 3 середню лінію 4, отримаємо розрахункову характеристику х.х.

Прямолінійна частина характеристики х.х. відповідає ненасиченій магнітній системі машини. При подальшому збільшенні струму магнітна система машини насичується і характеристика здобуває криволінійний характер.

Навантажувальна характеристика генератора. Ця характеристика виражає залежність напруги U на виході генератора від струму збудження $I_{зб}$ при незмінному струмі навантаження, наприклад, номінальному, і частоті обертання. При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС, тому навантажувальна характеристика 1 розташовується нижче характеристики холостого ходу 2 (рис. 2.33). Якщо із точки a , що відповідає номінальній напрузі $U_{ном}$, відкласти вгору відрізок ab , який дорівнює $I_a \sum R$, і провести горизонтально відрізок bc до перетинання з характеристикою х.х., а потім з'єднати точки a і c , то одержимо abc – трикутник реактивний (характеристичний).

Так, при роботі генератора в режимі х.х. при струмі збудження $I_{зб1} = I_{збном}$ напруга на виводах $U_0 = de$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_{ном} = ae$. Таким чином, відрізок da виражає значення напруги $\Delta U = U_0 - U_{ном}$ при $I_{зб1} = I_{збном}$. Напруга на виводах генератора в цьому випадку зменшилася в результаті дії двох причин: спадання напруги в колі якоря і впливу реакції якоря. Вимірявши значення опору кола якоря і підрахувавши спадання напруги $I_a \sum R$, можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження: $E_a = U + I_a \sum R$. На рисунку 2.33 ця ЕРС представлена відрізком be . Електрорушійна сила генератора при навантаженні менше, ніж у режимі х.х. ($be \leq de$), що пояснюється впливом 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 збудження $I_{зб2} \leq I_{зб1}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів збудження $(I_{зб1} - I_{зб2})$, являє собою струм збудження, що компенсує вплив реакції якоря.

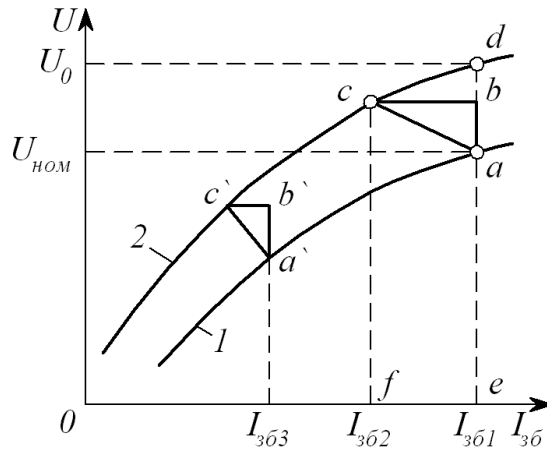


Рис. 2.33 – Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Катети реактивного трикутника кількісно визначають причини, які викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: спадання напруги в ланцюзі якоря визначає катет

$$ab = I_a \sum R. \quad (2.33)$$

Струм збудження $(I_{зб1} - I_{зб2})$, що компенсує дію реакції якоря, визначає катет

$$bc = I_{зб1} - I_{зб2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2W_{зб}}, \quad (2.34)$$

де F_{qd} і F_{ad} — поперечна і поздовжня складові реакції якоря;

$W_{зб}$ — число витків у полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник $a'b'c'$ побудований для іншого значення струму збудження $I_{зб3}$. Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінною ($a'b' = ab$), що пояснюється незмінністю струму навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася ($b'c' \leq bc$), тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і дія реакції якоря.

Зовнішня характеристика генератора – це залежність напруги U на виводах генератора від струму навантаження $I_{нав}$. При знятті даних для побудови зовнішньої характеристики, генератор приводять в обертання з номінальною швидкістю і навантажують його до

номінального струму при номінальній напрузі. Потім, поступово зменшуючи навантаження до х.х. ($I_{нев} = 0$), знімають показання приладів. Опір кола збудження $R_{зб}$ і частоту обертання протягом досліду підтримують незмінними.

На рисунку 2.34, а представлена зовнішня характеристика генератора незалежного збудження, з якої видно, що при збільшенні струму навантаження $I_{нев}$ напруга на виводах генератора знижується; це пояснюється впливом реакції якоря і спаданням напруги в колі якоря. Нахил зовнішньої характеристики до осі абсцис (жорсткість зовнішньої характеристики) оцінюється номінальною зміною напруги генератора при зниженні навантаження:

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \quad (2.35)$$

Зазвичай для генератора незалежного збудження $\Delta U_{ном} = 5 \div 10\%$.

Регульовальна характеристика генератора. Характеристика $I_{зб} = f(I_{нев})$ показує, як необхідно змінювати струм у колі збудження, 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 колі збудження встановлюють струм $I_{зб0}$, при якому напруга на виводах генератора стає рівною номінальній. Потім поступово збільшують навантаження генератора, одночасно підвищують струм збудження таким чином, щоб напруга генератора у всьому діапазоні навантажень залишалася рівною номінальній. Так одержують висхідну гілку характеристики (рис. 2.34, б, крива 1). Поступово зменшуючи навантаження генератора до х.х. і регулюючи відповідним чином струм навантаження, одержують спадну гілку характеристики (рис. 2.34, б, крива 2). Спадна гілка регульовальної характеристики розташована нижче висхідної, що пояснюється впливом збільшеного залишкового намагнічування магнітного кола машини в процесі зняття висхідної гілки. Середню криву 3, проведену між висхідною й спадною гілками, називають практичною регульовальною характеристикою генератора.

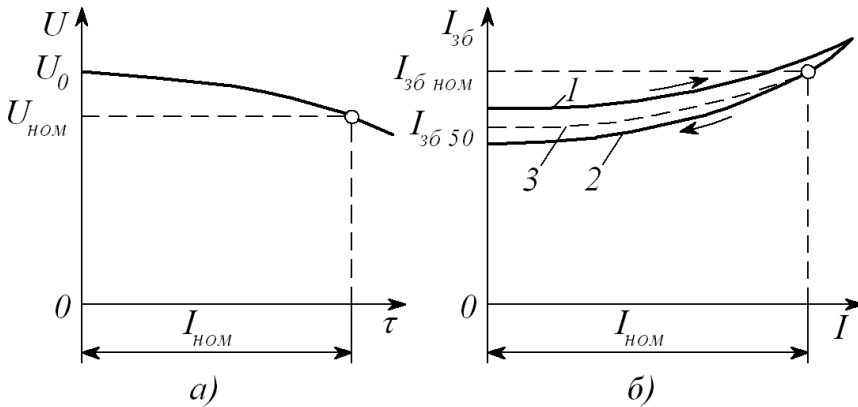


Рис. 2.34 – Зовнішня (а) і регульовальна (б) характеристики генератора незалежного збудження

Основний недолік генераторів незалежного збудження – це необхідність застосування стороннього джерела енергії постійного струму. Однак можливість регулювання напруги в широких межах, а також порівняно жорстка зовнішня характеристика цього генератора є його перевагами.

Генератор паралельного збудження

Принцип самозбудження генератора постійного струму заснований на тому, що магнітна система машини, будучи збудженою, зберігає тривалий час невеликий магнітний потік залишкового магнетизму осердя полюсів і станини $\Phi_{зал}$ (порядку 2–3% від повного потоку). При обертанні якоря потік індукує у якірній обмотці ЕРС $E_{зал}$, під дією якої в обмотці збудження виникає невеликий струм $I_{збзал}$. Якщо МРС обмотки збудження $I_{збзал}W_{зб}$ має такий же напрямок, як і потік $\Phi_{зал}$, то вона збільшує потік головних полюсів. Це, у свою чергу, викликає збільшення ЕРС генератора, від чого струм збудження знову збільшиться. Так буде тривати до тих пір, поки напруга генератора не буде врівноважена спаданням напруги в колі збудження, тобто $I_{зб}R_{зб} = U_0$.

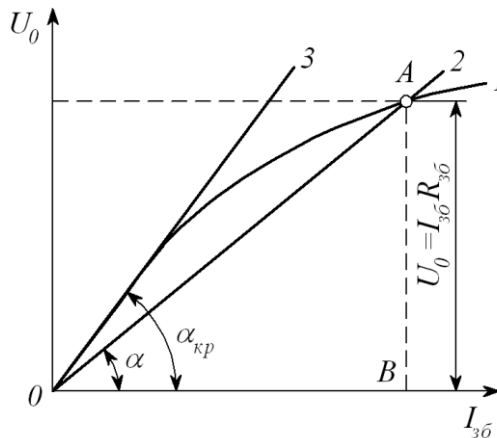


Рис. 2.35 – Характеристика х.х. генератора паралельного збудження

На рисунку 2.35 наведена характеристика х.х. генератора (крива 1) і залежність спадання напруги від струму збудження $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$ (пряма 2). Точка перетинання А відповідає закінченню процесу самозбудження, тому що саме в ній $U_0 = I_{зб} R_{зб}$.

Кут нахилу прямої ОА до осі абсцис визначається із трикутника ОАВ:

$$\frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_0}{I_{зб}} = R_{зб}, \quad (2.36)$$

де m_i – масштаб струму (по осі абсцис), А/мм;

m_u – масштаб напруги (по осі ординат), В/мм.

З (2.36) необхідно, щоб кут нахилу прямої $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$ до осі абсцис був прямо пропорційний опору кола збудження. Однак, при деякому значенні опору реостата $R_{рзб}$ опір $R_{зб}$ досягає значення, при якому залежність $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$ стає дотичною до прямолінійної частини характеристики х.х. (пряма 3). При виникненні цієї ситуації генератор не самозбуджується. Опір кола збудження, при якому припиняється самозбудження генератора, називають критичним опором $R_{збкрит}$.

Слід зазначити, що самозбудження генератора можливо лише при частоті обертання, що перевищує критичну $n_{кр}$. Ця умова витікає з характеристики самозбудження генератора (рис. 2.36) – залежності

напруги генератора в режимі х.х. від частоти обертання при незмінному опорі кола збудження, тобто $U_0 = f(n)$ при $R_{зб} = const$.

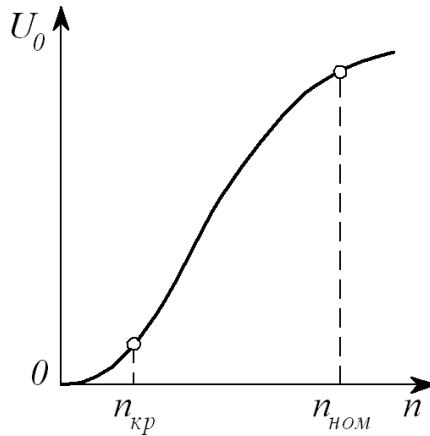


Рис. 2.36 – Характеристика самозбудження

Аналіз характеристики самозбудження показує, що при $n < n_{кр}$ збільшення частоти обертання якоря генератора супроводжується незначним збільшенням напруги, тому що процесу самозбудження не відбувається і поява напруги на виході генератора обумовлена лише залишковим намагнічуванням магнітного кола генератора. Процес самозбудження починається при $n > n_{кр}$. У цьому випадку збільшення частоти обертання супроводжується різким ростом напруги U_0 . Однак при частоті обертання, близькій до номінальної, ріст напруги вповільнюється, що пояснюється магнітним насиченням генератора. Критична частота обертання залежить від опору кола збудження і з ростом останнього збільшується.

Таким чином, самозбудження генераторів постійного струму можливо при дотриманні наступних умов:

- магнітна система машини повинна мати залишковий магнетизм;
- приєднання обмотки збудження повинне бути таким, щоб МРС обмотки збігалася за напрямком з потоком залишкового магнетизму $\Phi_{зал}$;
- опір кола збудження повинний бути менше критичного;
- частота обертання якоря повинна бути більше критичної.

Оскільки генератор паралельного збудження самозбуджується лише в одному напрямку, то характеристика х.х. цього генератора може бути знята тільки для одного квадранта осі координат.

Навантажувальна і регулювальна характеристики генератора паралельного збудження практично не відрізняються від відповідних характеристик генератора незалежного збудження.

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження (рис. 2.37, крива 1) менш жорстка, ніж у генератора незалежного збудження. Пояснюється це тим, що в генераторі паралельного збудження, крім причин, що викликають зменшення напруги в генераторі незалежного збудження (реакція якоря і спадання напруги в колі якоря), діє третя причина – зменшення струму збудження, викликане зниженням напруги від дії перших двох причин.

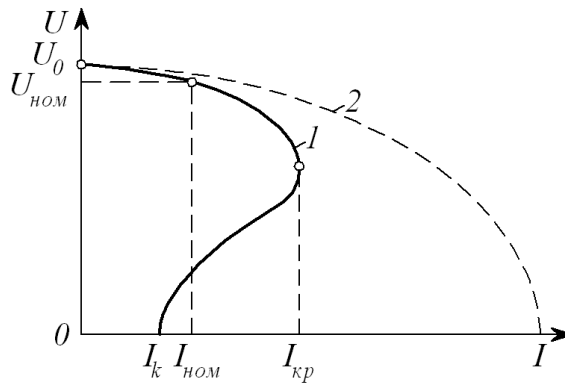


Рис. 2.37 – Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

Цією особливістю пояснюється і те, що при поступовому зменшенні опору навантаження $R_{нав}$ струм збільшується лише до критичного значення $I_{кр}$, а потім при подальшому зменшенні опору навантаження струм починає зменшуватися. Струм навантаження досягає значення при короткому замиканні $I_{нав} < I_{кр}$. Справа в тому, що зі збільшенням струму підсилюється розмагнічування генератора (посилення реакції якоря і зменшення струму збудження), машина переходить у ненасичений стан, при якому навіть невелике зменшення опору навантаження викликає різке зменшення ЕРС машини. Тому що струм визначається напругою на виводах генератора U і опором

навантаження $R_{\text{нав}}$, тобто $I = U / R_{\text{нав}}$, то при струмах навантаження $I_{\text{нав}} < I_{\text{кр}}$, коли напруга генератора зменшується повільніше, ніж зменшується опір навантаження, відбувається зростання струму навантаження. Після того як $I_{\text{нав}} = I_{\text{кр}}$, подальше зменшення $R_{\text{нав}}$ супроводжується зменшенням струму навантаження, тому що в цьому випадку напруга U зменшується швидше, ніж зменшується опір навантаження $R_{\text{нав}}$.

Таким чином, коротке замикання, викликане повільним зменшенням опору навантаження, не небезпечно для генератора паралельного збудження. Але при раптовому к.з. магнітна система генератора не встигає розмагнітитися і струм досягає небезпечних для машини значень $I_{\text{к}} = (8 \div 12) I_{\text{ном}}$ (рис. 2.37, крива 2). При такому різкому зростанні струму навантаження на валу генератора виникає значний гальмівний момент, а на колекторі з'являється сильне іскріння, що переходить у коловий вогонь. Тому необхідно захищати генератор від перевантаження і к.з.

Генератори паралельного збудження широко застосовують в установках постійного струму, тому що відсутність збуджувача вигідно відрізняє ці генератори від генераторів незалежного збудження. Номінальна зміна напруги генератора паралельного збудження становить 10–30%.

Генератор змішаного збудження

Генератор змішаного збудження має паралельну і послідовну обмотки збудження. Потік збудження створюється в основному паралельною обмоткою (60–80% від загального потоку). Послідовна обмотка звичайно включається узгоджено з паралельною (щоб МРС обмоток склалися), що забезпечує одержання жорсткої зовнішньої характеристики генератора.

В режимі х.х. генератор має тільки паралельне збудження, тому що $I_{\text{нав}} = 0$. З появою навантаження виникає МРС послідовної обмотки збудження, що, підмагнічуючи машину, компенсує дію реакції якоря і спадання напруги в якорі.

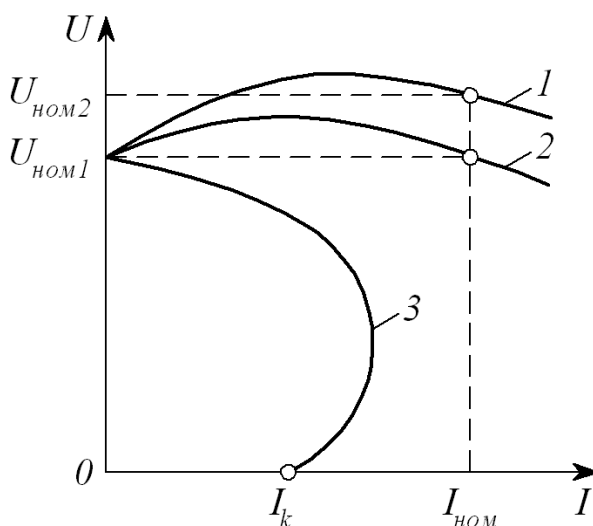


Рис. 2.38 – Зовнішні характеристики генератора змішаного збудження

Зовнішня характеристика в цьому випадку стає найбільш жорсткою (рис. 2.38, крива 2), тобто напруга на затискачах генератора при збільшенні струму залишається майже незмінною. Якщо ж потрібно, щоб напруга на затискачах споживача (наприкінці лінії) залишалася практично незмінною, то число витків послідовної обмотки збільшують таким чином, щоб МРС цієї обмотки компенсувала ще і спадання напруги в проводах лінії (рис. 2.38, крива 1).

При зустрічному включенні обмоток збудження напруга генератора із збільшенням струму навантаження різко зменшується (рис. 2.38, крива 3), що пояснюється дією розмагнічення магнітного кола послідовною обмоткою збудження, МРС якої спрямована проти МРС паралельної обмотки. Зустрічне включення обмоток застосовують лише в генераторах спеціального призначення, наприклад у зварювальних, де необхідно одержати різко спадаючу зовнішню характеристику.

Генератори змішаного збудження з узгодженим включенням обмоток застосовують для живлення силового навантаження у випадках, коли потрібна сталість напруги в лінії.

2.6 ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основні поняття

Машини постійного струму мають властивість зворотності, тобто вони можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Тому, якщо машину постійного струму підключити до джерела енергії постійного струму, то в обмотці збудження і в обмотці якоря машини з'являться струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створює на якорі електромагнітний момент M , що є не гальмівним, як це мало місце в генераторі, а обертовим.

Під дією електромагнітного моменту якоря машина почне обертатися, тобто машина буде працювати в режимі двигуна, споживаючи з мережі електричну енергію і перетворюючи її в механічну. У процесі роботи двигуна його якор обертається в магнітному полі. В обмотці якоря індукуються ЕРС E_a , напрямком якої можна визначити за правилом "правої руки". Вона не відрізняється від ЕРС, що наводиться в обмотці якоря генератора. У двигуні ж ЕРС спрямована проти струму I_a , і тому її називають протиелектро-рушійною силою (протиЕРС) якоря.

Для двигуна, що працює з постійною частотою обертання,

$$U = E_a + I_a \sum R. \quad (2.37)$$

З (2.37) видно, що підведена до двигуна напруга врівноважується протиЕРС обмотки якоря і спаданням напруги в колі якоря. На підставі (2.37) струм якоря

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum R}. \quad (2.38)$$

Помноживши обидві частини рівняння (2.37) на струм якоря I_a , одержимо рівняння потужності для кола якоря:

$$UI_a = I_a^2 \sum R + E_a I_a, \quad (2.39)$$

де UI_a – потужність в колі обмотки якоря;

$I_a^2 \sum R$ – потужність електричних втрат в колі якоря.

Для з'ясування сутності виразу $E_a I_a$ проведемо наступне перетворення:

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a,$$

або

$$E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega.$$

$$[pN/(2\pi a)] \Phi I_a = M$$

тоді

$$E_a I_a = M\omega = P_{em}, \quad (2.40)$$

де $\omega = 2\pi n/60$ – кутова частота обертання якоря;

P_{em} – електромагнітна потужність двигуна.

Отже, вираз $E_a I_a$ – це електромагнітна потужність двигуна.

Перетворивши вираз (2.39) з урахуванням (2.40), одержимо

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum R.$$

Аналіз цього рівняння показує, що зі збільшенням навантаження на вал двигуна, тобто зі збільшенням електромагнітного моменту M , зростає потужність у колі обмотки якоря UI_a , тобто потужність на вході двигуна. Але тому що напруга, яка підводиться до двигуна, підтримується незмінною ($U = \text{const}$), то збільшення навантаження двигуна супроводжується зростанням струму в обмотці якоря I_a .

Залежно від способу збудження двигуни постійного струму, так само як і генератори, розділяють на двигуни зі збудженням від постійних магнітів (магнітоелектричні) і з електромагнітним збудженням. Останні згідно зі схемою включення обмотки збудження відповідно обмотки якоря підрозділяють на двигуни паралельного (шунтові), послідовного (серієсні) і змішаного збудження.

Відповідно до формули ЕРС $E_a = c_e \Phi n$ частота обертання двигуна (об/хв)

$$n = E_a / (c_e \Phi).$$

Підставивши значення E_a з (2.37), одержимо

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e \Phi}, \quad (2.41)$$

тобто частота обертання двигуна прямо пропорційна напрузі і обернено пропорційна магнітному потоку збудження. Фізично це пояснюється тим, що підвищення напруги U або зменшення потоку Φ викликає збільшення різниці $(U - E_a)$; це, в свою чергу, веде до зростання струму I_a . Внаслідок цього збільшення струму підвищує

обертальний момент, і якщо при цьому навантажувальний момент залишається незмінним, то частота обертання двигуна збільшується.

З (2.41) виходить, що регулювати частоту обертання двигуна можна зміною або напруги U , що підводиться до двигуна, або основного магнітного потоку Φ , або електричного опору в колі якоря ΣR .

Напрямок обертання якоря залежить від напрямків магнітного потоку збудження Φ і струму в обмотці якоря. Тому, змінивши напрямок будь-якої із зазначених величин, можна змінити напрямок обертання якоря. Необхідно зауважити, що перемикання загальних затисків схеми живлення не дає зміни напрямку обертання якоря, тому що при цьому одночасно змінюється напрямок струму і в обмотці якоря, і в обмотці збудження.

Пуск двигунів постійного струму

Струм якоря двигуна визначається формулою (2.38). Якщо прийняти U і ΣR незмінними, то струм I_a залежить від протиЕРС E_a . Найбільшого значення струм I_a досягає при пуску двигуна в хід. У початковий момент пуску якір двигуна нерухомий ($n=0$) і в його обмотці не індукуюється ЕРС ($E_a=0$). Тому при безпосередньому підключенні двигуна до мережі в обмотці якоря виникає пусковий струм

$$I_{an} = U / \Sigma R. \quad (2.42)$$

Опір ΣR невеликий, тому значення пускового струму сягає неприпустимо великих значень, в 10–50 разів перевищуючи номінальний струм двигуна.

Такий великий пусковий струм досить небезпечний для двигуна. По-перше, він може викликати в машині коловий вогонь, а по-друге, при такому струмі у двигуні розвивається надмірно великий пусковий момент, що робить ударну дію на обертові частини двигуна і може механічно їх зруйнувати. І нарешті, цей струм викликає різке спадання напруги в мережі, що несприятливо впливає на роботу інших споживачів, включених у цю мережу. Тому пуск двигуна безпосереднім підключенням у мережу (безреостатний пуск) зазвичай застосовують для двигунів потужністю не більше 0,7–1,0 кВт. У цих двигунах завдяки підвищеному опору обмотки якоря і невеликій масі обертових частин значення пускового струму лише в 3–5 разів перевищує номінальне, що не становить небезпеки для двигуна. Що ж стосується

двигунів середньої і великої потужності, то при їхньому пуску для обмеження пускового струму використовують пускові реостати, що включаються послідовно в коло якоря (реостатний пуск).

Перед пуском двигуна необхідно важіль П реостата поставити на холостий контакт "0" (рис. 2.39). Потім включають рубильник, переводять важіль на перший проміжний контакт 1 і коло якоря двигуна виявляється підключеним до мережі через найбільший опір реостата $R_{pa} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$.

Одночасно через важіль П і шини Ш до мережі підключається обмотка збудження, струм у якій протягом усього періоду пуску не залежить від положення важеля П, тому що опір шини в порівнянні з опором обмотки збудження незначний.

З появою струму в колі якоря $I_{n\max}$ виникає пусковий момент $M_{n\max}$, під дією якого починається обертання якоря. При зростанні частоти обертання збільшується протиЕРС $E_a = c_e \Phi n$, що веде до зменшення пускового струму і пускового моменту.

У міру розгону якоря двигуна важіль пускового реостата перемикають у положення 2, 3 і т.д. У положенні 5 важеля реостата пуск двигуна закінчується ($R_{pa} = 0$). Опір пускового реостата вибирають таким, щоб найбільший пусковий струм перевищував номінальний не більш ніж в 2–3 рази.

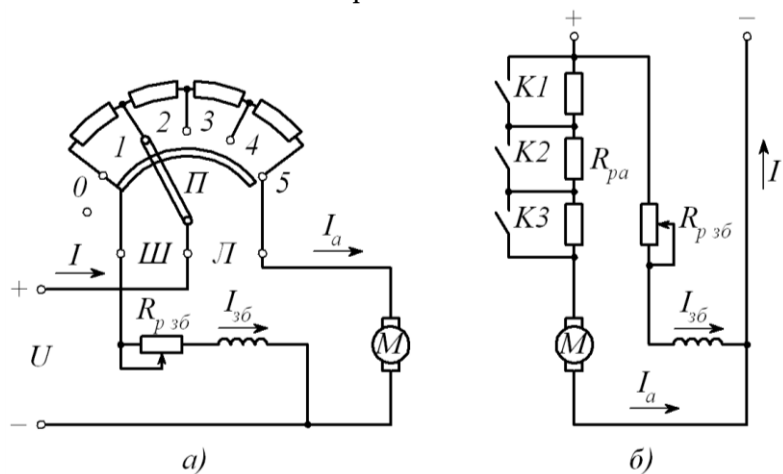


Рис. 2.39 – Схема пуску двигуна паралельного збудження за допомогою пускового реостата а) і пускових опорів б)

Пусковий струм якоря при повному опорі пускового реостата

$$I_n = \frac{U - E_a}{\Sigma R + R_{pa}}. \quad (2.43)$$

Оскільки обертальний момент двигуна M прямо пропорційний потоку Φ , то для полегшення пуску двигуна паралельного і змішаного збудження опір реостата в колі збудження $R_{pzб}$ варто повністю вивести ($R_{pzб} = 0$). Потік збудження Φ у цьому випадку отримує найбільше значення і двигун розвиває необхідний обертальний момент при меншому струмі якоря.

Для пуску двигунів більшої потужності застосовувати пускові реостати недоцільно, тому що це призводить до значних втрат енергії. Крім того, пускові реостати мають великі масогабаритні показники. Тому у двигунах великої потужності застосовують безреостатний пуск двигуна шляхом зниження напруги.

Двигуни паралельного збудження

Схема включення в мережу двигуна паралельного збудження аналогічна схемі включення генератора паралельного збудження. Характерною рисою цього двигуна є те, що струм в обмотці збудження не залежить від струму навантаження (струму якоря). Реостат у колі збудження $R_{pzб}$ призначений для регулювання струму в обмотці збудження і магнітного потоку головних полюсів.

Експлуатаційні якості двигуна визначаються його робочими характеристиками, під якими розуміють залежність частоти обертання n , струму I , корисного моменту M_2 , обертового моменту M від потужності на валу двигуна P_2 при $U = const$ і $I_{зб} = const$ (рис. 2.40).

Для аналізу залежності $n = f(P_2)$, що називають швидкісною характеристикою, звернемося до виразу (2.41), з якого видно, що при незмінній напрузі U на частоту обертання впливають два фактори: спадання напруги в колі якоря $I_a \Sigma R$ і потік збудження Φ . При збільшенні навантаження зменшується чисельник $(U - I_a \Sigma R)$, при цьому внаслідок реакції якоря зменшується і знаменник Φ . Звичайне ослаблення потоку, викликане реакцією якоря, незначне і перший фактор впливає на частоту обертання сильніше, ніж другий. У підсумку частота обертання двигуна з ростом навантаження P_2

зменшується, а графік $n = f(P_2)$ набуває спадного вигляду з невеликою опуклістю, зверненої до осі абсцис. Якщо ж реакція якоря у двигуні супроводжується більш значним ослабленням потоку Φ , то частота обертання зі збільшенням навантаження буде зростати, як це показано штриховою кривою на рисунку. Однак така залежність $n = f(P_2)$ є небажаною, тому що вона, як правило, не задовольняє умові сталої роботи двигуна: зі зростанням навантаження на двигун зростає частота обертання, що веде до додаткового росту навантаження і т.д., тобто частота обертання n двигуна необмежено збільшується і двигун іде “у рознос”. Щоб забезпечити характеристиці частоти обертання форму спадної кривої, у деяких двигунах паралельного збудження застосовують легку (з невеликим числом витків) послідовну обмотку збудження, яку називають стабілізуючою обмоткою. При включенні цієї обмотки узгоджено з паралельною обмоткою збудження її МРС компенсує дію реакції якоря таким чином, що потік Φ у всьому діапазоні навантажень залишається практично незмінним.

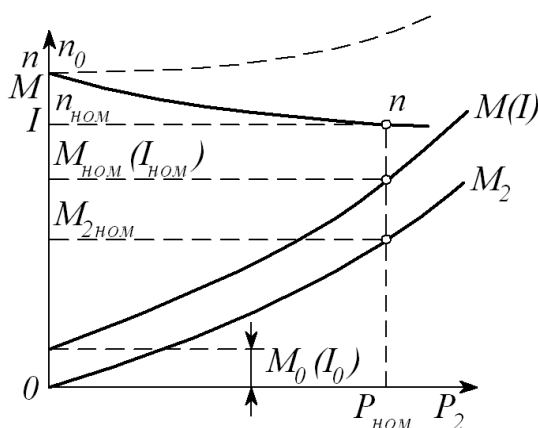


Рис. 2.40 – Робочі характеристики двигуна паралельного збудження

Зміну частоти обертання двигуна при переході від номінального навантаження до х.х., виражену у відсотках, називають номінальною зміною частоти обертання:

$$\Delta n_{\text{НОМ}} = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} \cdot 100, \quad (2.44)$$

де n_0 – частота обертання двигуна в режимі х.х.

Для двигунів паралельного збудження $\Delta n_{\text{юм}} = 2 \div 8\%$, тому характеристику частоти обертання двигуна паралельного збудження називають жорсткою.

Залежність корисного моменту M_2 від навантаження встановлена формулою $M_2 = 9,55P_2 / n$. 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 $M_2 = f(P_2)$ криволінійна.

При $n = \text{const}$ обертальний момент двигуна $M = M_0 + M_2$. Тому що робочі характеристики двигуна будують за умови $I_{\text{зб}} = \text{const}$, 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 виразом залежності $I = f(P_2)$, тому що $M = c_M \Phi I_a$.

Для одержання аналітичного виразу механічної характеристики $n = f(M)$ проведемо перетворення виразу (2.41):

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \sum R}{c_e \Phi}; \quad (2.45)$$

підставивши в нього значення струму якоря

$$I_a = M / (c_M \Phi), \quad (2.46)$$

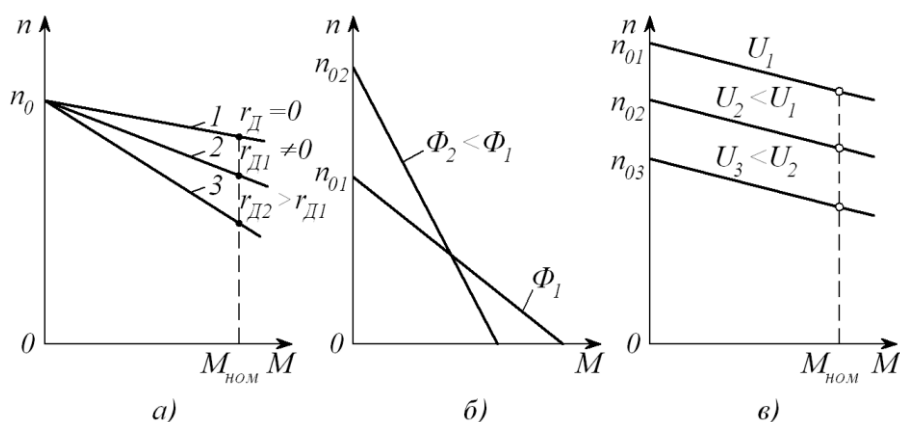
одержимо

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum R}{c_e c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (2.47)$$

де n_0 – частота обертання в режимі х.х.;

Δn – зміна частоти обертання, викликана зміною навантаження на валу двигуна.

Якщо не зважати на дію реакції якоря, то (тому що $I_{\text{зб}} = \text{const}$) можна прийняти $\Phi = \text{const}$. Тоді механічна характеристика двигуна паралельного збудження – це пряма лінія, нахилена до осі абсцис (рис. 2.41). Кут нахилу механічної характеристики тим більше, чим більше значення опору, включеного в коло якоря. Механічну характеристику двигуна при відсутності додаткового опору в колі якоря називають природною (пряма 1). Механічні характеристики двигуна, отримані при введенні додаткового опору в коло якоря, називають штучними (прямі 2 і 3).



а) – при введенні в коло якоря додаткового опору; б) – при зміні основного магнітного потоку; в) – при зміні напруги в колі якоря

Рис. 2.41 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження

Вид механічної характеристики залежить також і від значення основного магнітного потоку Φ . Так, при зменшенні Φ збільшується частота обертання х.х. n_0 і одночасно збільшується Δn , тобто збільшуються обидві складові рівняння. Це приводить до різкого збільшення нахилу механічної характеристики, тобто до зменшення її жорсткості (рис. 2.41).

При зміні напруги на якорі U міняється частота обертання n_0 , а Δn залишається незмінною. У підсумку жорсткість механічної характеристики (якщо знехтувати впливом реакції якоря) не міняється (рис. 2.41), тобто характеристики зміщуються по висоті, залишаючись паралельними одна одній.

Регулювання частоти обертання двигунів паралельного збудження

Способи регулювання частоти обертання двигунів оцінюються наступними показниками: плавністю регулювання; діапазоном регулювання, обумовленим відношенням найбільшої частоти обертання до найменшої; економічністю регулювання, обумовленою вартістю регулюючої апаратури і втратами електроенергії в ній.

З (2.41) виходить, що регулювати частоту обертання двигуна паралельного збудження можна зміною опору в колі якоря, зміною основного магнітного потоку, зміною напруги в колі якоря.

Введення додаткового опору в коло якоря. Додатковий опір (реостат R_{pa}) включають в коло якоря аналогічно пусковому реостату. Однак на відміну від останнього, додатковий опір повинний бути розрахований на тривале протікання струму.

При включенні опору R_{pa} в коло якоря вираз частоти (2.41) набуває вигляду

$$n = \frac{U - I_a(\sum R + R_{pa})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (2.47)$$

де $n_0 = U / (c_e \Phi)$ – частота обертання в режимі х.х.;

$\Delta n = I_a(\sum R + R_{pa}) / (c_e \Phi)$ – зміна частоти обертання, викликана спаданням напруги в колі якоря.

Зі збільшенням R_{pa} зростає Δn , що призводить до зменшення частоти обертання. Залежність $n = f(R_{pa})$ ілюструється також і механічними характеристиками двигуна паралельного збудження (рис. 2.40): з підвищенням R_{pa} збільшується нахил механічних характеристик, а частота обертання при заданому навантаженні на валу ($M = M_{ном}$) зменшується. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання частоти обертання в широкому діапазоні (тільки убик зменшення частоти від номінальної), однак він неекономічний через значні втрати електроенергії в регульовальному реостаті ($I_a^2 R_{pa}$), які інтенсивно ростуть зі збільшенням потужності двигуна.

Зміна основного магнітного потоку. Цей спосіб регулювання у двигуні паралельного збудження реалізується за допомогою реостата $R_{pзб}$ в колі обмотки збудження. Так, при зменшенні опору реостата зростає магнітний потік обмотки збудження, що супроводжується зниженням частоти обертання. При збільшенні $R_{pзб}$ частота обертання зростає. Залежність частоти обертання від струму збудження виражається регульовальною характеристикою двигуна $n = f(I_{зб})$ при $I = const$ і $U = const$.

З виразу (2.41) n збільшується за гіперболічним законом (рис. 2.42). Але одночасне зменшення Φ веде до росту струму якоря $I_a = M / (c_M \Phi)$. При потоці $\Phi = \Phi'$ струм якоря досягає значення

$I'_a = U / (2 \sum R)$, тобто спадання напруги в колі якоря досягає значення, рівного половині напруги, підведеної до якоря ($I'_a \sum R = U / 2$). У цих умовах частота обертання двигуна досягає максимуму $n_{\max}$. При подальшому зменшенні потоку ($\Phi < \Phi'$) частота обертання двигуна починає зменшуватися, тому що через інтенсивне зростання струму I_a друга складова рівняння (2.47) наростає швидше першого.

При невеликому навантажувальному моменті на валу двигуна максимальна частота обертання $n_{\max}$ в багато разів перебільшує номінальну частоту обертання двигуна $n_{\text{ном}}$ і є неприпустимою за умовами механічної міцності двигуна, тобто може привести до його "розносу". З огляду на це, при виборі реостата $R_{\text{рзб}}$ необхідно стежити за тим, щоб при повністю введеному його опорі частота обертання двигуна не перевищила припустимого значення.

Необхідно також стежити за надійністю електричних з'єднань у колі обмотки збудження двигуна, тому що при розриві цього кола магнітний потік зменшується до значення потоку залишкового магнетизму $\Phi_{\text{зал'}}$, при якому частота обертання може досягти небезпечного значення.

Вид регулювальних характеристик $n = f(\Phi)$ залежить від значення навантажувального моменту M_2 на валу двигуна: з ростом M_2 максимальна частота обертання $n_{\max}$ зменшується (рис. 2.42, б).

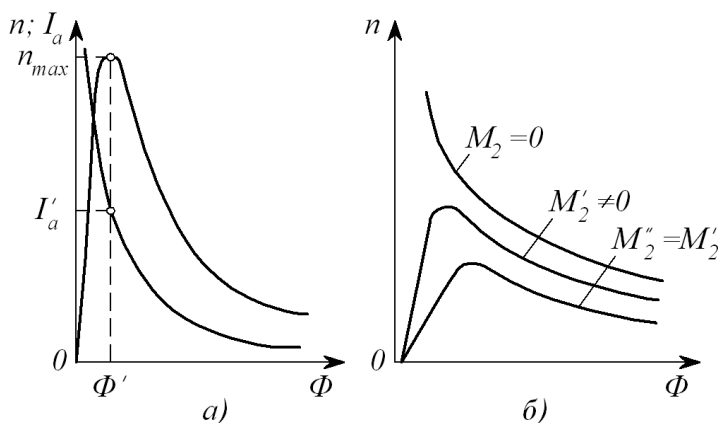


Рис. 2.42 – Регулювальні характеристики двигуна паралельного збудження

Недолік розглянутого способу регулювання частоти обертання полягає в тому, що при зміні магнітного потоку Φ змінюється кут нахилу механічної характеристики двигуна.

Розглянутий спосіб регулювання частоти обертання простий і економічний, тому що у двигунах паралельного збудження струм $I_{зб} = (0,01 \div 0,07)I_a$, а тому втрати в регулювальному реостаті ($I_{зб}^2 R_{рзб}$) невеликі.

Однак діапазон регулювання становить $n_{\max}/n_{\min} = 2 \div 5$. Пояснюється це тим, що нижня межа частоти обертання обумовлена насиченням машини, що обмежує значення магнітного потоку Φ , а верхня межа частоти – небезпекою “розносу” двигуна і посиленням впливу реакції якоря, спотворююча дія якої при ослабленні основного магнітного потоку Φ підсилюється і веде до іскріння на колекторі або до появи колового вогню.

Зміна напруги в колі якоря. Регулювання частоти обертання двигуна зміною живлячої напруги застосовується лише при $I_{зб} = \text{const}$, тобто при роздільному живленні кіл обмотки якоря і обмотки збудження при незалежному збудженні.

Частота обертання в режимі х.х. n_0 пропорційна напрузі, а Δn від напруги не залежить, тому механічні характеристики двигуна при зміні напруги не міняють кута нахилу до осі абсцис, а зміщуються по висоті, залишаючись паралельними одна одній. Для здійснення цього способу регулювання необхідно коло якоря двигуна підключити до джерела живлення з регульованою напругою. Для керування двигунами малої і середньої потужності як джерело можна застосувати регульований випрямляч, у якому напруга постійного струму міняється регульовальним автотрансформатором (АТ), включеним на вході випрямляча (рис. 2.43).

Для керування двигунами великої потужності доцільно застосовувати генератор постійного струму незалежного збудження; привод здійснюється за допомогою приводного двигуна (ПД), у якості якого використовують трифазний двигун змінного струму. Для живлення постійним струмом кіл збудження генератора Г и двигуна Д використовується збуджувач В – генератор постійного струму, напруга на виході якого підтримується незмінною. Описана схема керування двигуном постійного струму (рисунок) відома за назвою системи “генератор – двигун” (Г-Д).

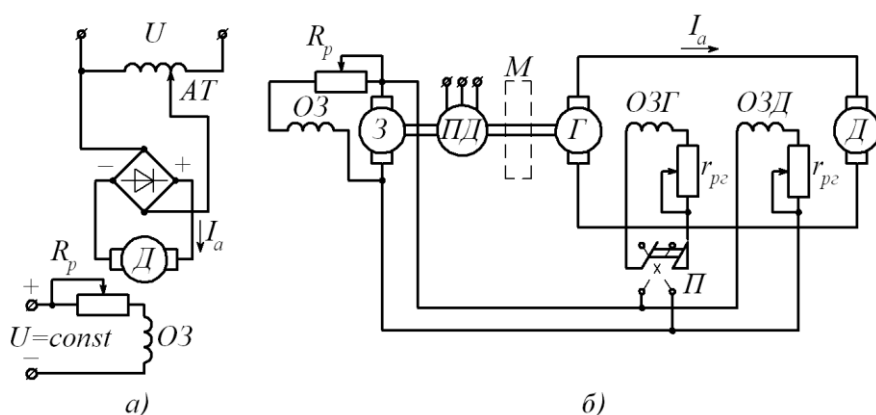


Рис. 2.43 – Схеми включення двигунів постійного струму при регулюванні частоти обертання зміною напруги в колі якоря

Зміна напруги в колі якоря дозволяє регулювати частоту обертання двигуна вниз від номінальної, тому що напруга понад номінальну неприпустима. За необхідності регулювання частоти обертання вгору від номінальної можна скористатися зміною струму збудження двигуна.

Зміна напрямку обертання (реверс) двигуна, що працює за системою Г-Д, здійснюється зміною напрямку струму в колі збудження генератора Г перемикачем П, тобто зміною полярності напруги на його затискачах. Якщо двигун постійного струму працює в умовах різкозмінного навантаження, то для зменшення коливань потужності, споживаної ПД із трифазної мережі, на вал ПД поміщають маховик М, що запасає енергію в період зменшення навантаження на двигун Д і віддає її в період інтенсивного навантаження двигуна.

Регулювання частоти обертання зміною напруги в колі якоря забезпечує плавне економічне регулювання в широкому діапазоні $n_{\max}/n_{\min} \geq 25$. Найбільша частота обертання обмежується умовами комутації, а найменша – умовами охолодження двигуна.

Ще однією перевагою розглянутого способу регулювання є те, що він допускає безреостатний пуск двигуна при зниженій напрузі.

Імпульсне регулювання частоти обертання. Сутність цього способу регулювання ілюструється схемою, зображеною на рис. 2.44.

Коло обмотки якоря двигуна паралельного (незалежного) збудження періодично переривається ключем K . Під час замикання кола якоря на час t до обмотки якоря підводиться напруга $U = U_{\text{им}}$ і струм у ній досягає значення $I_{a\text{max}}$. Потім ключем K коло якоря розмикають і струм у ньому зменшується, досягаючи до моменту наступного замикання кола значення $I_{a\text{min}}$ (при розмиканні ключа K струм в обмотці якоря замикається через діод VD). При наступному замиканні ключа K струм досягає значення $I_{a\text{max}}$ і т.д. Таким чином, до обмотки якоря підводиться деяка середня напруга

$$U_{cp} = Ut/T = \alpha U, \quad (2.48)$$

де T – відрізок часу між двома наступними один за одним імпульсами напруги (рис. 2.44, б);

$\alpha = t/T$ – коефіцієнт керування.

При цьому в обмотці якоря проходить струм, середнє значення якого $I_{acp} = 0,5(I_{a\text{max}} + I_{a\text{min}})$.

При імпульсному регулюванні частота обертання двигуна

$$n = \frac{\alpha U - I_{acp} \sum R}{c_e \Phi}. \quad (2.49)$$

Таким чином, імпульсне регулювання частоти обертання аналогічне регулюванню зміною напруги, що підводиться до якоря. З метою зменшення пульсацій струму в коло якоря включена котушка індуктивності (дросьль) L , а частота подачі імпульсів дорівнює 200 – 400 Гц.

На рисунку 2.44, в 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 (КЕ) тиристора. Коло L_1C , шунтувальний тиристор, служить для запирання останнього в період між двома керуючими імпульсами. Відбувається це в такий спосіб: при відкриванні тиристора конденсатор C перезаряджається через контур L_1C і створює на силових електродах тиристора напругу, зворотну напрузі мережі, що припиняє протікання струму через тиристор. Параметрами кола L_1C визначається час відкритого стану тиристора: $t = \pi \sqrt{L_1C}$.

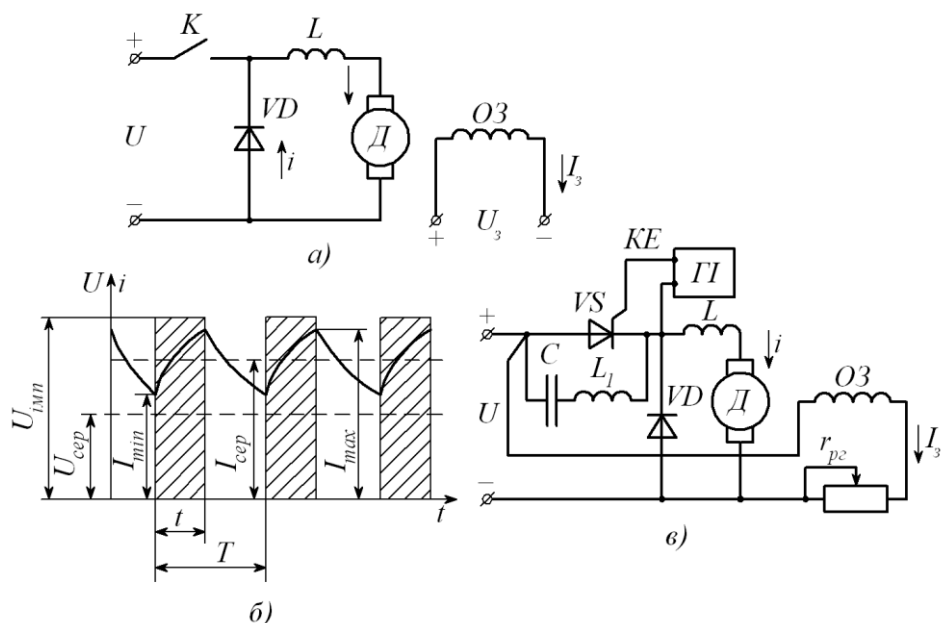


Рис. 2.44 – Імпульсне регулювання частоти обертання двигуна постійного струму

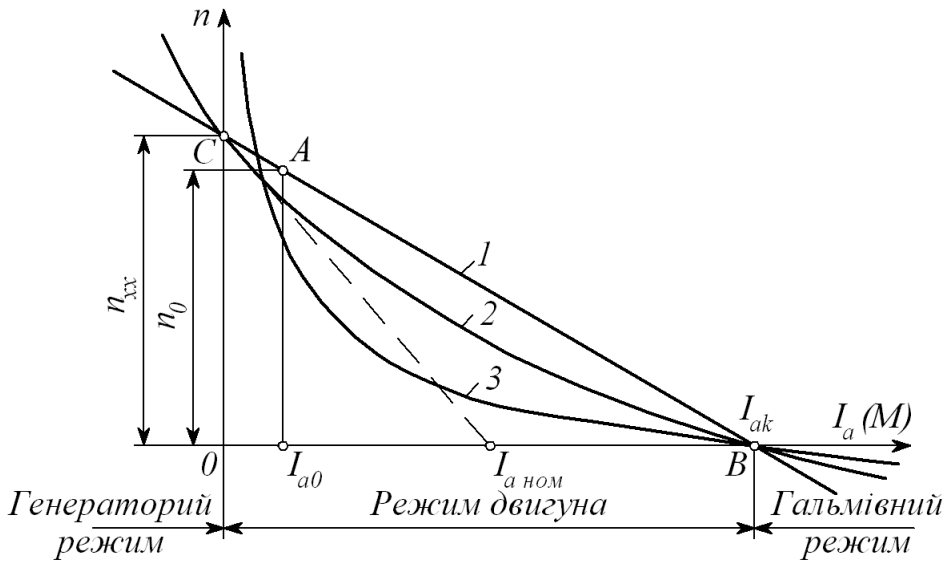
Значення середньої напруги U_{cp} регулюється зміною частоти проходження керуючих імпульсів від генератора імпульсів на тиристор VS.

Жорсткі механічні характеристики і можливість плавного регулювання частоти обертання в широкому діапазоні визначили області застосування двигунів паралельного збудження у верстатних приводах, вентиляторах, а також у багатьох інших випадках регульованого електропривода, де потрібна стійка робота при коливаннях навантаження.

Режими роботи двигунів постійного струму

У двигунах паралельного збудження при незмінному струмі в обмотці збудження ($I_{зб} = const$) магнітний потік змінюється при навантаженні досить мало, тому з деяким наближенням можна прийняти $\Phi = const$. У цьому випадку електромагнітний момент пропорційний струму в колі якоря і механічна характеристика $n = f(M)$ може бути представлена залежністю $n = f(I_a)$ (рис. 2.45).

Якщо цю характеристику продовжити в обидва боки за межі осей координат (пряма 1), то можна показати, що електрична машина залежно від величини і знака зовнішнього моменту, що діє на її вал з боку пов'язаного з ним механізму, може працювати в трьох режимах: в режимі двигуна, гальмівному і генераторному.



1 – з паралельним (незалежним) збудженням; 2 – зі змішаним збудженням; 3 – з послідовним збудженням

Рис. 2.45 – Режимы роботи двигуна постійного струму

При роботі двигуна без навантаження струм у колі якоря I_{a0} невеликий. При цьому частота обертання $n = n_0$ (точка A). Потім з появою на валу двигуна навантажувального моменту, що протидіє обертовому, струм у колі якоря зростає, а частота обертання зменшується. Якщо збільшити протидіючий момент до значення, при якому якір двигуна зупиниться (точка B), то ЕРС $E_a = 0$ і струм двигуна досягає значення $I_{ak} = U / \sum R$. Якщо двигун застосовують для привода механізму, навантажувальний момент якого може бути більше обертового (наприклад, привод барабана, на який намотується трос із вантажем), то при наступному збільшенні навантажувального моменту цього механізму якір машини знову почне обертатися, але тепер уже в іншу сторону. Тепер момент, що діє на вал електричної машини з боку

навантажувального механізму, буде обертовим, а електромагнітний момент машини – гальмівним, тобто електрична машина перейде в гальмівний режим. При роботі машини в цьому режимі ЕРС якоря діє узгоджено з напругою, тобто $I_a = (U + E_a) / \sum R$.

При використанні машини в гальмівному режимі необхідно вжити заходів для обмеження струму якоря. Із цією метою в коло якоря включають додатковий опір, величина якого забезпечує одержання штучної характеристики двигуна, що перетинається з віссю абсцис при струмі якоря $I_{аю.м} < I_{ак}$ (штрихова пряма).

Якщо при роботі двигуна в режимі х.х. до його вала прикласти момент, спрямований убік обертання якоря, то частота обертання, а отже, і ЕРС E_a почнуть зростати. Коли ЕРС $E_a = U$, машина не буде споживати струму з мережі (точка С) і частота обертання якоря досягає значення, що називається пограничною частотою обертання $n_{х.х.}$.

При подальшому збільшенні зовнішнього моменту на валу машини ЕРС E_a стане більше напруги, а в колі якоря знову виникне струм, але іншого напрямку. При цьому машина перейде в генераторний режим: механічна енергія, що витрачається на обертання якоря, буде перетворюватися в електричну і надходити в мережу.

Переведення машини з режиму двигуна в генераторний режим використовують для гальмування двигуна, тому що в генераторному режимі електромагнітний момент є гальмівним (рекуперативне гальмування).

Двигуни послідовного збудження

У цьому двигуні обмотка збудження включена послідовно в коло якоря, тому магнітний потік Φ у ньому залежить від струму навантаження $I = I_a = I_{зб.}$. При невеликих навантаженнях магнітна система машини не насичена й залежність магнітного потоку від струму навантаження прямо пропорційна, тобто $\Phi = k_\phi I_a$. У цьому випадку знайдемо електромагнітний момент:

$$M = c_M k_\phi I_a I_a = c'_M I_a^2.$$

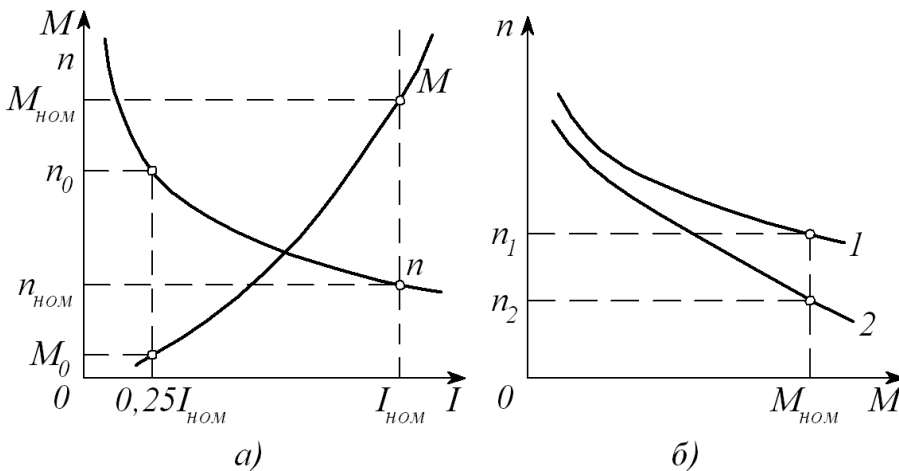
Формула частоти обертання (2.41) набуде вигляду

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e k_\phi I_a} = \frac{U - I_a \sum r}{c'_e I_a}, \quad (2.50)$$

де k_ϕ – коефіцієнт пропорційності.

На рисунку 2.46 представлені робочі характеристики $M = f(I)$ і $n = f(I)$ двигуна послідовного збудження. При більших навантаженнях настає насичення магнітної системи двигуна. У цьому випадку магнітний потік при зростанні навантаження практично не змінюється і характеристики двигуна набувають майже прямолінійного характеру. Характеристика частоти обертання двигуна послідовного збудження показує, що частота обертання двигуна значно міняється при змінах навантаження. Таку характеристику прийнято називати м'якою.

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 номінального неприпустиме.



a – робочі характеристики; b – механічні характеристики;
 1 – природна характеристика; 2 – штучна характеристика

Рис. 2.46 – Двигун послідовного збудження

Для більш надійної роботи вал двигуна послідовного збудження повинен бути жорстко з'єднаний з робочим механізмом за допомогою муфти і зубчастої передачі. Застосування пасової передачі неприпустиме, тому що при обриві або скиданні ремня 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 щитку, але не менше ніж на 50% більше номінальної.

Механічні характеристики двигуна послідовного збудження $n = f(M)$ представлені на рисунку 2.46, б. Різко спадаючі криві механічних характеристик (природна 1 і штучна 2) забезпечують двигуну послідовного збудження сталу роботу при будь-якому механічному навантаженні. Властивість цих двигунів розвивати великий обертовий момент, пропорційний квадрату струму навантаження, має важливе значення, особливо у складних умовах пуску і при перевантаженнях, тому що з поступовим збільшенням навантаження двигуна потужність на його вході росте повільніше, ніж обертальний момент. Ця особливість двигунів послідовного збудження є однією із причин їхнього широкого застосування в якості тягових двигунів на транспорті, у всіх випадках електропривода зі складними умовами пуску і поєднанні значних навантажень на валу двигуна з малою частотою обертання.

Номінальна зміна частоти обертання двигуна послідовного збудження

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_{[0,25]} - n_{ном}}{n_{ном}} 100\%, \quad (2.51)$$

де $n_{[0,25]}$ – частота обертання при навантаженні двигуна, що становить 25% від номінальної.

Частоту обертання двигунів послідовного збудження можна регулювати або зміною напруги U , або магнітного потоку обмотки збудження. У першому випадку в коло якоря послідовно включають регульовальний реостат R_{pa} (рис. 2.48, а). Зі збільшенням опору цього реостата зменшуються напруга на вході двигуна і частота його обертання. Цей метод регулювання застосовують головним чином у двигунах невеликої потужності. У випадку значної потужності двигуна

цей спосіб неекономічний через великі втрати енергії в R_{pa} . Крім того, реостат R_{pa} , що розраховується на робочий струм двигуна, виходить громіздким і дорогим.

При спільній роботі декількох однотипних двигунів частоту обертання регулюють зміною схеми їхнього включення відносно один одного (рис. 2.48, б). Так, при паралельному включенні двигунів кожний з них опиняється під повною напругою мережі, а при послідовному включенні двох двигунів на кожний двигун припадає половина напруги мережі. При одночасній роботі більшої кількості двигунів можлива більша кількість варіантів включення. Цей спосіб регулювання частоти обертання застосовують в електровозах, де встановлено кілька однакових тягових двигунів.

Зміна напруги, що підводиться до двигуна, можлива при живленні двигуна від джерела постійного струму з регульованою напругою. При зменшенні напруги його механічні характеристики зміщуються вниз, практично не міняючи своєї кривизни (рис. 2.47).

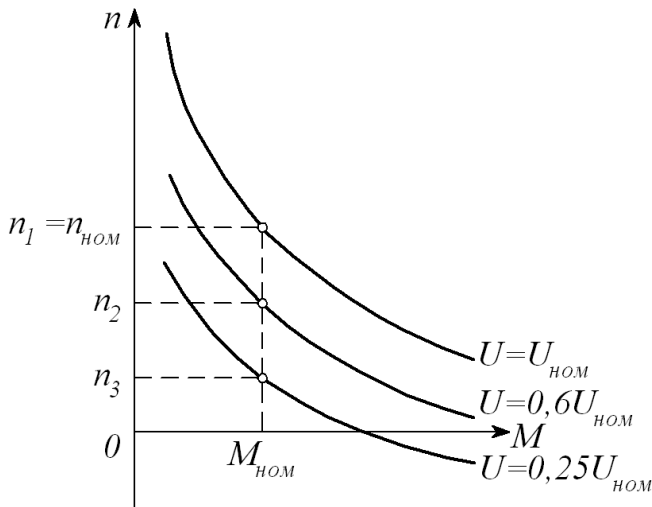


Рис. 2.47 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при зміні напруги

Регулювати частоту обертання двигуна зміною магнітного потоку можна трьома способами: шунтуванням обмотки збудження реостатом r_{p2} , секціонуванням обмотки збудження і шунтуванням

обмотки якоря реостатом $r_{ш}$. Включення реостата $r_{пз}$, що шунтує обмотку збудження (рис. 2.48, в), а також зменшення опору цього реостата веде до зниження струму збудження $I_{зб} = I_a - I_{пз}$, а отже, до зростання частоти обертання. Цей спосіб економічніший за попередній (рис. 2.48, а), застосовується частіше і оцінюється коефіцієнтом регулювання $k_{пз} = (I_{пз} / I_a) \cdot 100\%$. Звичайний опір реостата $r_{пз}$ приймається таким, щоб $k_{пз} \geq 50\%$.

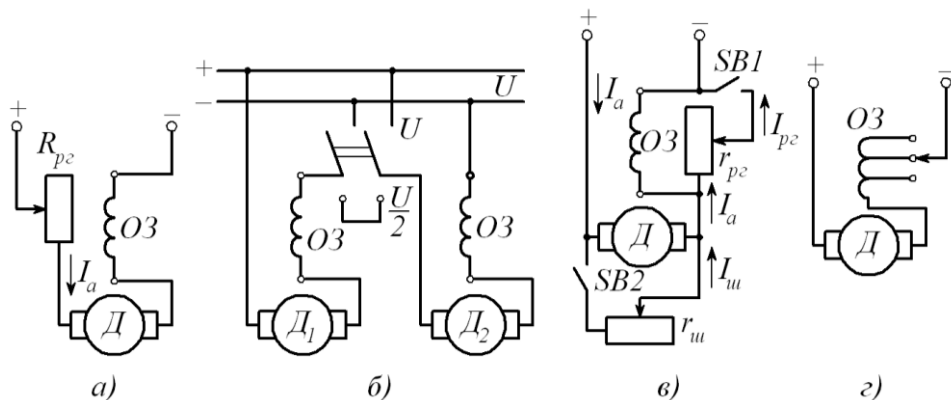


Рис. 2.48 – Регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження

При секціонуванні обмотки збудження (рис. 2.48, г) відключення частини витків обмотки супроводжується зростанням частоти обертання. При шунтуванні обмотки якоря реостатом $r_{ш}$ (рис. 2.48, в) збільшується струм збудження $I_{зб} = I_a + I_{ш}$, що викликає зменшення частоти обертання. Цей спосіб регулювання, хоча й забезпечує глибоке регулювання, неекономічний і застосовується дуже рідко.

Двигун змішаного збудження

Двигун змішаного збудження має дві обмотки збудження: паралельну і послідовну. Частота обертання цього двигуна

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)}, \quad (2.52)$$

де Φ_1 і Φ_2 – потоки паралельної і послідовної обмоток збудження.

Знак плюс відповідає узгодженому включенню обмоток збудження (МРС обмоток складаються). У цьому випадку зі збільшенням навантаження загальний магнітний потік зростає (за рахунок потоку послідовної обмотки Φ_2), що веде до зменшення частоти обертання двигуна. При зустрічному включенні обмоток потік Φ_2 при збільшенні навантаження розмагнічує машину (знак мінус), що, навпаки, підвищує частоту обертання. Робота двигуна при цьому стає нестійкою, тому що зі збільшенням навантаження частота обертання необмежено росте. Однак при невеликому числі витків послідовної обмотки зі збільшенням навантаження частота обертання не зростає і у всьому діапазоні навантажень залишається практично незмінною.

На рисунку 2.49 показані робочі і механічні характеристики двигуна змішаного збудження при узгодженому включенні обмоток збудження. На відміну від механічних характеристик двигуна послідовного збудження останні мають більш пологий вид.

Слід зазначити, що за своєю формою характеристики двигуна змішаного збудження займають проміжне положення між відповідними характеристиками двигунів паралельного і послідовного збудження залежно від того, в якій з обмоток збудження (паралельній або послідовній) переважає МРС.

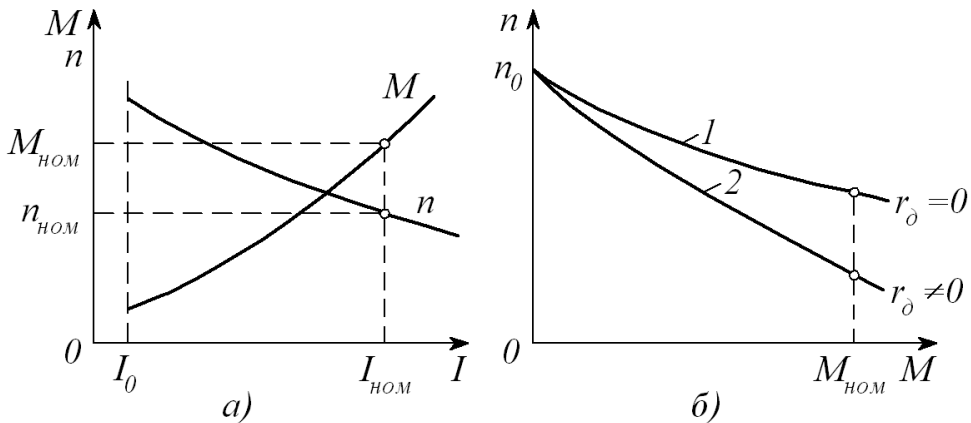


Рис. 2.49 – Робочі а) і механічні б) характеристики двигуна змішаного збудження

Двигун змішаного збудження має переваги в порівнянні із двигуном послідовного збудження. Цей двигун може працювати на холостому ході, тому що потік паралельної обмотки Φ_1 обмежує частоту обертання двигуна в режимі х.х. і усуває небезпеку “розносу”. Регулювати частоту обертання цього двигуна можна реостатом у колі паралельної обмотки збудження. Однак наявність двох обмоток збудження робить двигун змішаного збудження більш дорожчим у порівнянні із двигунами розглянутих вище типів, що обмежує його застосування. Двигуни змішаного збудження застосовують зазвичай там, де потрібні значні пускові моменти, швидке прискорення при розгоні, усталена робота і припустимо лише невелике зниження частоти обертання при збільшенні навантаження на вал (прокатні стани, вантажні підйомники, насоси, компресори).

2.7 ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ І КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Класифікація і види втрат

У машинах постійного струму, як і в інших електричних машинах, мають місце магнітні, електричні і механічні втрати (складові групи основних втрат) і додаткові втрати.

Магнітні втрати P_M відбуваються тільки в осерді якоря, тому що тільки цей елемент магнітопроводу машини постійного струму піддається переманічуванню. Величина магнітних втрат, що складаються із втрат від гістерезису і втрат від вихрових струмів, залежить від частоти переманічування $f = pn/60$, значень магнітної індукції в зубцях і спинці якоря, товщини листів електротехнічної сталі, її магнітних властивостей і якості ізоляції цих листів у пакеті якоря.

Електричні втрати в машині постійного струму обумовлені нагріванням обмоток і щіткового контакту. Втрати в колі збудження визначаються втратами в обмотці збудження і у реостаті, включеному в коло збудження:

$$P_{еб} = U_{зб} I_{зб}, \quad (2.53)$$

де $U_{зб}$ – напруга на затискачах кола збудження.

Втрати в обмотках кола якоря

$$P_{e.a} = I_a^2 \sum R, \quad (2.54)$$

де $\sum R$ – опір обмоток у колі якоря, приведений до розрахункової робочої температури θ_{pab} .

Електричні втрати також мають місце і у контакті щіток:

$$P_{e.щ} = \Delta U_{щ} I_a, \quad (2.55)$$

де $\Delta U_{щ}$ – перехідне спадання напруги на щітках обох полярностей, прийняте відповідно до марки щіток.

Електричні втрати в колі якоря і у щітковому контакті залежать від навантаження машини, тому ці втрати називають змінними.

У машині постійного струму механічні втрати складаються із втрат від тертя щіток об колектор

$$P_k = k_{mp} S_{щ} f_{щ} V_k, \quad (2.56)$$

тертя в підшипниках P_{Π} і на вентиляцію $P_{вен}$

$$P = P_k + P_{\Pi} + P_{вен}, \quad (2.57)$$

де k_{mp} – коефіцієнт тертя щіток об колектор ($k_{mp} = 0,2 \div 0,3$);

$S_{щ}$ – поверхня зіткнення всіх щіток з колектором;

$f_{щ}$ – питомий тиск щітки.

Окружна швидкість колектора діаметром D_k

$$V_k = \pi D_k n / 60. \quad (2.58)$$

Механічні магнітні втрати при стабільній частоті обертання ($n = const$) можна вважати постійними.

Сума магнітних і механічних втрат становить втрати х.х.:

$$P_0 = P_m + P_{мех}. \quad (2.59)$$

Якщо машина працює як двигун паралельного збудження в режимі х.х., то вона споживає з мережі потужність

$$P_{10} = U I_{a0} + U_{зб} I_{зб} = P_m + P_{мех} + I_{a0}^2 \sum R + \Delta U_{щ} I_{a0} + U_{зб} I_{зб}. \quad (2.60)$$

Однак через невелике значення струму I_{a0} електричні втрати $I_{a0}^2 \sum R$ і $\Delta U_{\text{щ}} I_{a0}$ досить малі і зазвичай не перевищують 3% втрат $P_0 = P_m + P_{\text{мех}}$. Тому, не допускаючи помітної помилки, можна записати $P_{10} = UI_{a0} + U_{3\phi} I_{3\phi} = P_0 + U_{3\phi} I_{3\phi}$, звідки втрати х.х.

$$P_0 = P_{10} - U_{3\phi} I_{3\phi}. \quad (2.61)$$

Таким чином, втрати х.х. (магнітні і механічні) можуть бути визначені експериментально.

У машинах постійного струму є ряд втрат, які складно врахувати, – додаткових. Ці втрати складаються із втрат від вихрових струмів, втрат у зрівнювальних з'єднаннях, у сталі якоря через нерівномірний розподіл індукції при навантаженні, у полюсних наконечниках, обумовлених пульсацією основного потоку через наявність зубців якоря. Додаткові втрати не піддаються точному обліку і становлять незначну величину. Тому у машинах без компенсаційної обмотки значення додаткових втрат P_ϕ приймають рівним 1% від корисної потужності для генераторів або 1% від споживаної з мережі потужності для двигунів. У машинах з компенсаційною обмоткою значення додаткових втрат приймають рівним відповідно 0,5%.

Потужність на вході машини постійного струму (споживана):
для генератора (механічна потужність)

$$P_{1\text{ген}} = M_1 \omega = 0,105 M_1 n, \quad (2.62)$$

де M_1 – обертальний момент приводного двигуна;

для двигуна (електрична потужність)

$$P_{1\text{дв}} = UI. \quad (2.63)$$

Потужність на виході машини (корисна потужність):
для генератора (електрична потужність)

$$P_{2\text{ген}} = UI; \quad (2.64)$$

для двигуна (механічна потужність)

$$P_{2\text{дв}} = 0,105 M_2 n, \quad (2.65)$$

де M_1 і M_2 – момент на валу електричної машини;

n – частота обертання, об/хв.

Коефіцієнт корисної дії

Коефіцієнт корисної дії електричної машини – це відношення потужностей – корисної P_2 до споживаної P_1

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Визначивши сумарну потужність перерахованих вище втрат

$$\sum P = P_m + P_{\text{мех}} + P_{\text{е.зб}} + P_{\text{еа}} + P_{\text{еиц}} + P_{\text{д}}, \quad (2.66)$$

можна підрахувати ККД машини за однією з наступних формул:

для генератора

$$\eta_{\text{Г}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{UI + \sum P}; \quad (2.67)$$

для двигуна

$$\eta_{\text{ДВ}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - \sum P}{UI} = 1 - \frac{\sum P}{UI}. \quad (2.68)$$

ККД машин постійного струму становить 0,75–0,90 для машин потужністю від 1 до 100 кВт і 0,90–0,97 для машин потужністю понад 100 кВт. Набагато менше ККД машин постійного струму малої потужності. Наприклад, для машин потужністю від 5 до 50 Вт $\eta = 0,15 \div 0,50$. Зазначені значення ККД відповідають номінальному навантаженню машини. Залежність ККД машини постійного струму від навантаження виражається графіком $\eta = f(P_2)$, форма якого характерна для електричних машин (рис. 2.50).

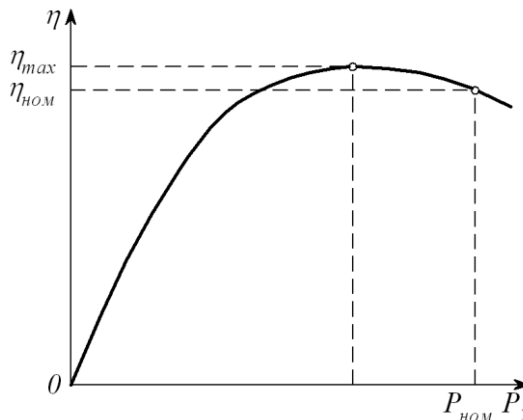


Рис. 2.50 – Залежність $\eta = f(P_2)$

Коефіцієнт корисної дії електричної машини можна визначати:
а) методом безпосереднього навантаження за результатами вимірів підведеної P_1 і P_2 потужностей, що віддається; б) непрямим методом за результатами вимірів втрат.

Метод безпосереднього навантаження застосовується тільки для машин малої потужності, для інших випадків застосовується непрямий метод, як більш точний і зручний. Установлено, що при $\eta > 80\%$ вимірювати ККД методом безпосереднього навантаження недоцільно, тому що він дає більшу помилку, ніж при застосуванні непрямого методу.

Існує кілька непрямих способів визначення ККД. Найбільш простий спосіб холостого ходу двигуна, коли споживана машиною постійного струму потужність витрачається тільки на втрати х.х. Що ж стосується електричних втрат, то їх визначають розрахунковим шляхом після попереднього виміру електричних опорів обмоток і приведення їх до робочої температури.

2.8 МІКРОМАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Електромашинний підсилювач

Електромашинний підсилювач (ЕМП) – це електрична машина, що працює в генераторному режимі і призначена для посилення електричних сигналів. ЕМП застосовуються в системах автоматики. Найпростіший ЕМП – це генератор постійного струму незалежного збудження. Тому що напруга на виході генератора залежить від струму збудження, тобто, змінюючи струм збудження, можна керувати напругою на виході генератора. Отже, порівняно невеликою потужністю в колі обмотки збудження можна керувати значною потужністю в колі якоря.

Електромашинні підсилювачі, виконані за принципом генератора незалежного збудження, не знайшли широкого застосування, тому що вони не можуть забезпечити досить великого коефіцієнта підсилення (відношення потужності на виході підсилювача до потужності на вході обмотки керування) по потужності (не більше 80–100)

Найбільшого поширення в автоматичі одержали електромашинні підсилювачі поперечного поля. На відміну від звичайного генератора постійного струму в цьому ЕМП основним робочим

поток є магнітний потік, створюваний струмом обмотки якоря, – поперечний потік реакції якоря.

На колекторі ЕМП встановлено два комплекти щіток: один комплект – q_1q_2 (рис. 2.51) – розташований по поперечній осі головних полюсів, тобто на геометричній нейтралі, а інші – d_1d_2 – по поздовжній осі головних полюсів. Щітки q_1q_2 замкнені накоротко, а до щіток d_1d_2 підключено робоче коло ЕМП.

Крім обмотки якоря підсилювач має одну або кілька обмоток керування (y_1, y_2), компенсаційну обмотку (ОК), поперечну підмагнічувальну обмотку (ОП) і обмотку додаткових полюсів (ОД). Якір підсилювача приводиться в обертання електродвигуном.

Якщо до однієї з обмоток керування підвести напругу U_y , то в цій обмотці з'явиться струм керування I_y , що створює МРС обмотки керування $F_K = I_K W_K$. Ця МРС, у свою чергу, створює магнітний потік Φ_y , що наведе в обмотці якоря в колі щіток q_1q_2 ЕРС E_q . Електро-рушійна сила E_q невелика, але тому що щітки q_1q_2 замкнуті накоротко, то ЕРС E_q викличе значний струм I_q . Струм в обмотці якоря I_q створить МРС F_q і магнітний потік Φ_q , 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 знімається з поздовжніх щіток d_1d_2 .

Якщо до вихідних затискачів ЕМП підключити навантаження r_n , то ЕРС E_d створить у колі щіток d_1d_2 робочий струм I_d .

Таким чином, невелика потужність обмотки керування проходить два рівні підсилення: спочатку ця потужність підсилюється на рівні “коло керування – поперечне коло”, а потім на рівні “поперечне коло – поздовжнє коло”.

Посилення потужності на кожному рівні характеризується коефіцієнтом підсилення, що на рівні “коло керування – поперечне коло” визначається відношенням потужності в поперечному колі $P_q = E_q I_q$ до потужності керування $P_y = U_y I_y$

$$k_{y1} = P_q / P_y. \quad (2.69)$$

Коефіцієнт підсилення на рівні “поперечне коло – поздовжнє коло” визначається відношенням потужностей у цих ланцюгах:

$$k_{y2} = P_d / P_q, \quad (2.70)$$

де $P_d = U_d I_d$ – потужність у робочому колі підсилювача, тобто в колі щіток $d_1 d_2$.

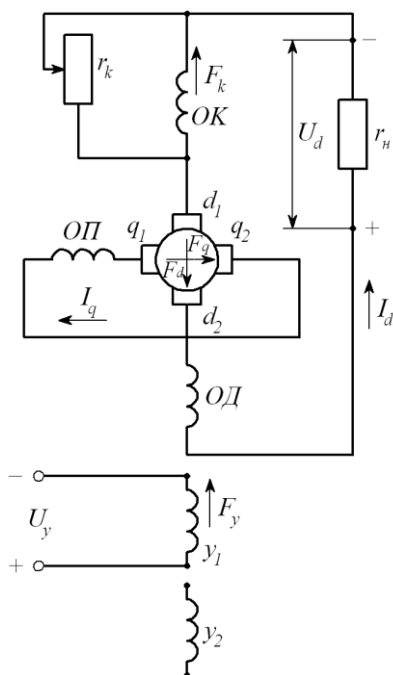


Рис. 2.51 – ЕМП поперечного поля

Загальний коефіцієнт підсилення ЕМП дорівнює добутку окремих коефіцієнтів підсилення

$$k_y = k_{y1} k_{y2} = (P_q / P_y) (P_d / P_q) = P_d / P_y. \quad (2.71)$$

Коефіцієнт підсилення електромашинних підсилювачів може досягати 2000–20000.

Варто пам'ятати, що потужність на виході ЕМП P_d – це перетворена механічна потужність приводного електродвигуна, яка може досягати більше 20 кВт. Потужність сигналу керування зазвичай складає 0,1–1,0 Вт.

Тахогенератор постійного струму

Тахогенератори постійного струму призначені для вимірювання частоти обертання за значенням вихідної напруги, а також для одержання електричних сигналів, пропорційних частоті обертання вала в схемах автоматичного регулювання. **Тахогенератор постійного струму** – це генератор малої потужності з електромагнітним незалежним збудженням (рис. 2.52) або зі збудженням постійними магнітами.

Через те, що при постійному струмі збудження $I_{зб} = const$ магнітний потік Φ практично не залежить від навантаження, вихідна ЕРС тахогенератора $E_{вих}$ прямо пропорційна частоті обертання:

$$E_{вих} = c_e \Phi n = c'_e n, \quad (2.72)$$

де $c'_e = c_e \Phi = const.$

Рівняння (2.72) справедливе і для тахогенератора зі збудженням 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, градуйованою в одиницях частоти обертання.

Точність роботи тахогенератора визначається його вихідною характеристикою – залежністю вихідної напруги від частоти обертання n при незмінному значенні опору навантаження. Найбільш точна робота тахогенератора відповідає прямолінійній вихідній характеристиці (рис. 2.52, б, пряма 1).

Однак у реальних тахогенераторах вихідна характеристика не прямолінійна (рис. 2.52, б, лінія 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 із збільшеним внутрішнім опором, тому що при зменшенні струму якоря послаблюється 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. Межа зони нечутливості визначається виразом

$$n_{\min} = \Delta U_{\text{из}} / (c_e \Phi). \quad (2.73)$$

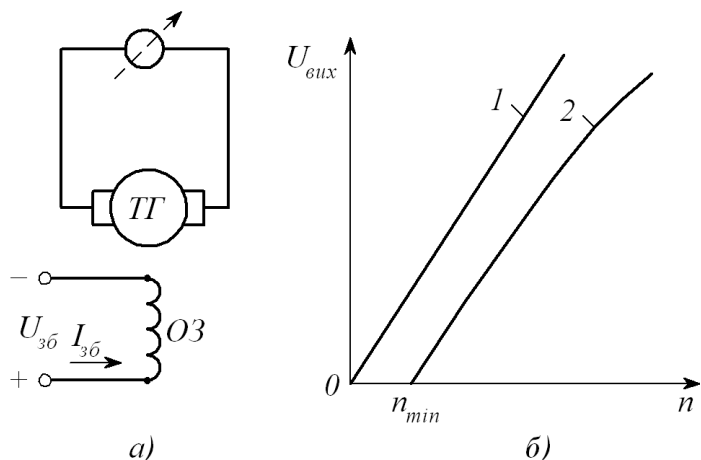


Рис. 2.52 – Принципова схема а), вихідна характеристика б) тахогенератора постійного струму

Широке застосування одержали тахогенератори постійного струму з постійними магнітами. Ці тахогенератори не мають обмотки збудження, і тому вони простіші за конструкцією і мають менші габарити.

Виконавчі двигуни постійного струму

Виконавчі двигуни постійного струму застосовуються в системах автоматики для перетворення електричного сигналу в механічне переміщення. Крім звичайних вимог, що ставляться до електродвигунів загального призначення, до виконавчих двигунів висувається ряд специфічних вимог, з яких основними є відсутність самоходу і малоінерційність.

Майже всі виконавчі двигуни (виключення становлять лише двигуни з постійними магнітами) мають дві обмотки. Одна з них постійно підключена до мережі і називається обмоткою збудження, на іншу — обмотку керування — електричний сигнал подається лише тоді, коли необхідно викликати обертання вала. Від напруги керування

залежать частота обертання і обертальний момент виконавчого двигуна, а отже, і механічна потужність, що розвивається ним.

Виконавчі двигуни постійного струму за конструкцією відрізняються від двигунів постійного струму загального призначення тільки тим, що мають шихтовані (набрані з листів електротехнічної сталі) якір, станину і 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 наш час використовують найчастіше двигуни з незалежним збудженням, рідше – двигуни з постійними магнітами. У двигунів з незалежним збудженням в якості обмотки керування використовують або обмотку якоря – двигуни з якірним керуванням, або обмотку полюсів – двигуни з полюсним керуванням.

У виконавчих двигунів з якірним керуванням обмоткою збудження є обмотка полюсів, а обмоткою керування – обмотка якоря (рис. 2.53, *а*). Обмотку збудження підключають до мережі з постійною напругою $U_{зб}$ 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 обертальний 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 (рис. 2.53, *б*). Якір двигуна постійно підключений до мережі з напругою $U_{зб} = const$. Для обмеження струму іноді послідовно з якорем включають додатковий (баластовий) опір R_d . На обмотку полюсів напругу керування U_y (сигнал) подають лише тоді, коли необхідно викликати обертання якоря.

Виконавчі двигуни постійного струму звичайної конструкції мають істотний недолік – сповільненість перехідних процесів, тобто відсутність малоінерційності. Пояснюється це в основному двома причинами: наявністю масивного якоря зі сталевим сердечником, що має значний момент інерції, і значної індуктивності L_a обмотки якоря, закладеної в пази осердя якоря. Остання причина сприяє збільшенню

електромагнітної постійної часу $T = L_a / \Sigma R$. Зазначені недоліки відсутні у двигунів із гладким (порожнім) якорем (рис. 2.54). Станина 1 і полюси 3 цих двигунів такі самі, як у двигунів загальнопромислового виконання. Збудження двигуна здійснюється або за допомогою обмотки збудження 2, або постійними магнітами.

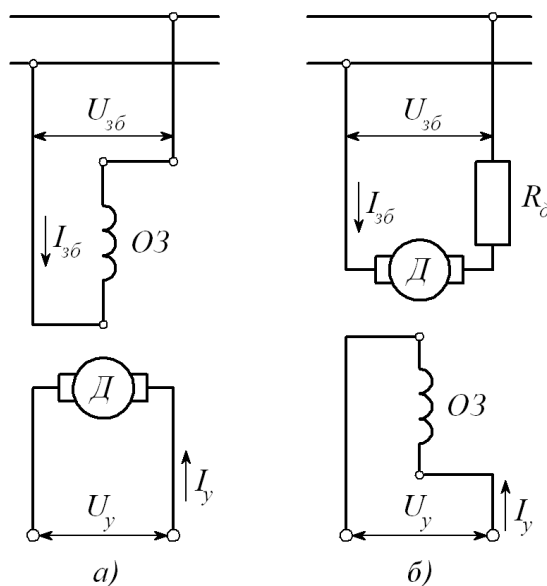


Рис. 2.53 – Схема включення виконавчих двигунів постійного струму

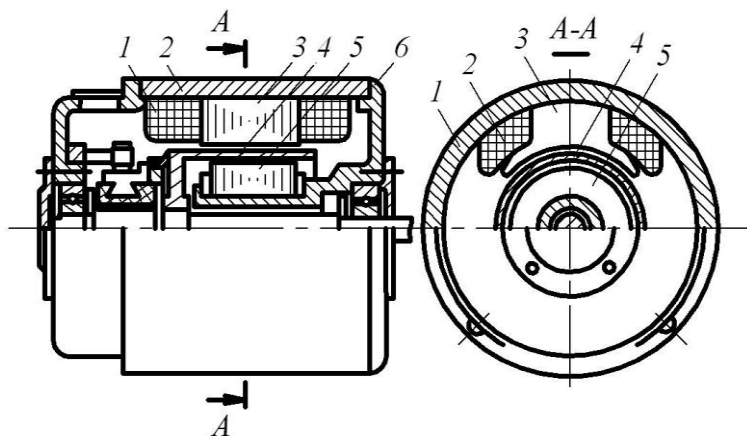


Рис. 2.54 – Малоінерційний виконавчий двигун постійного струму з порожнім якорем

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 якорь 4 – це порожнистий циліндр, що складається із провідників обмотки, зв'язаних воедино пластмасою. Кінці секцій обмотки, як і у звичайному двигуні, з'єднуються із пластинами колектора, що є частиною дна порожнистого циліндра якоря 4. Обертовий вузол двигуна із гладким якорем складається з вала, колектора й обмотки якоря, залитої пластмасою.

Момент інерції порожнього якоря значно менше моменту інерції звичайного якоря, що забезпечує належну швидкість двигуна. Крім того, індуктивність обмотки якоря знижується, що також сприяє підвищенню швидкості двигуна. До того ж зниження індуктивності обмотки поліпшує комутацію двигуна за рахунок зменшення реактивної ЕРС.

Недолік розглянутого малоінерційного двигуна з порожнім якорем – наявність великого немагнітного проміжку між полюсами статора й нерухомим феромагнітним осердям – внутрішнім статором. Цей проміжок складається із двох повітряних зазорів і товщини циліндра якоря (товщини шарів обмотки якоря). Наявність великого немагнітного проміжку на шляху магнітного потоку вимагає значного збільшення МРС збудження, що приводить, по-перше, до збільшення габаритів двигуна через збільшення об'єму обмотки збудження, а по-друге, до зростання втрат на нагрівання обмотки збудження. Однак ККД двигуна з порожнім якорем внаслідок відсутності втрат у сталі сердечника якоря практично перебуває на тому ж рівні, що і у звичайних двигунах, а у випадку застосування для збудження постійних моментів значно перевершує ККД останніх.

? КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. В чому полягає принцип дії генератора постійного струму?
2. Яке призначення колектора та щіток при роботі машини в режимі генератора?
3. Яка роль статора машини постійного струму?
4. Яку конструкцію має статор машини постійного струму?
5. Яку конструкцію має головний полюс машини постійного струму?
6. Яку конструкцію має щітковий апарат?
7. Яка конструкція колектора машини постійного струму?
8. Що називається обмоткою якоря машини постійного струму?
9. Що таке секція обмотки якоря?
10. Що таке паралельні гілки обмотки?
11. За якою формулою визначається електромагнітний момент машини? (Вивести її).
12. Як визначається електромагнітна потужність через механічні та електричні величини?
13. Що називається реакцією якоря?
14. Що називається комутацією в машині постійного струму?
15. Які причини викликають іскріння між колектором і щітками?
16. На які класи за ступенем іскріння між колектором і щітками поділяється комутація?
17. Де застосовуються генератори постійного струму?
18. Як класифікуються генератори постійного струму?
19. Пояснити принцип самозбудження генератора постійного струму.
20. Пригадати і пояснити принцип дії генератора постійного струму та його конструкцію.
21. Де застосовуються двигуни постійного струму?
22. Як класифікуються двигуни постійного струму?
23. Яким чином можна регулювати частоту обертання двигуна постійного струму?
24. Які характеристики називають робочими, як вони знімаються і будуються для двигунів незалежного збудження?

3 ТРАНСФОРМАТОРИ

3.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРАНСФОРМАТОРИ

Призначення і принцип дії трансформаторів

Трансформатором називається статичний апарат, що має дві або більше обмотки, призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінної напруги і струму в одну або декілька інших систем змінної напруги і струмів, що мають інші значення за незмінної частоти, з метою передачі потужності.

У загальному випадку вторинна система змінного струму може відрізнятися від первинної будь-якими параметрами: значеннями напруги і струму, числом фаз, формою кривої напруги (струму), частотою. Найбільше застосування в електротехнічних установках, а також в енергетичних системах передачі і розподілу електроенергії мають силові трансформатори, за допомогою яких змінюють значення змінної напруги і струму. При цьому число фаз, форма кривої напруги (струму) і частота залишаються незмінними.

Залежно від призначення трансформатори розділяють на силові трансформатори загального призначення і трансформатори спеціального призначення. Силові трансформатори загального призначення застосовуються в лініях передачі і розподілу електроенергії, а також у різних електроустановках для одержання необхідної напруги. Трансформатори спеціального призначення характеризуються різноманітністю робочих властивостей і конструктивного виконання. До цих трансформаторів відносяться пічні і зварювальні трансформатори, трансформатори для пристроїв автоматики (під-трансформатори, імпульсні, множники частоти і т.п.), випробувальні і вимірювальні трансформатори і т.д.

Найпростіший силовий трансформатор складається з магнітопроводу (осердя), виконаного з феромагнітного матеріалу (зазвичай листово електротехнічна сталь), і двох обмоток, розташованих на стрижнях магнітопроводу (рис. 3.1, а). Одна з обмоток, що зветься первинною, приєднана до джерела змінного струму на напругу U_1 . До іншої обмотки, що зветься вторинною, підключено навантаження Z_n . Первинна і вторинна обмотки трансформатора не мають електричного

зв'язку і потужність із однієї обмотки в іншу передається електромагнітним шляхом.

Магнітопровід, на якому розташовані ці обмотки, служить для посилення індуктивного зв'язку між обмотками.

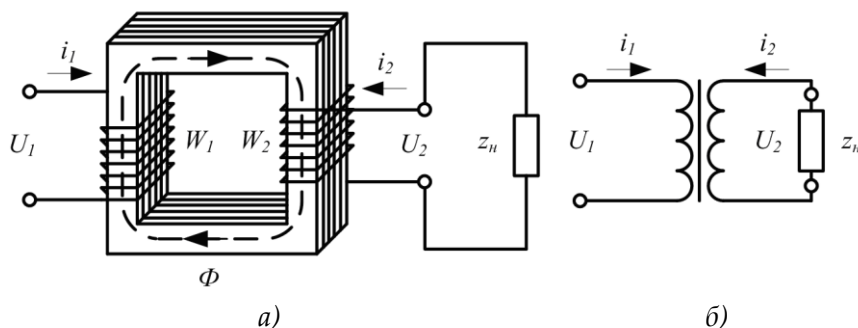


Рис. 3.1 – Електромагнітна (а) і принципова (б) схеми трансформатора

Дія трансформатора заснована на явищі електромагнітної індукції. При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму у витках цієї обмотки протікає змінний струм i_1 , що створює в магнітопроводі змінний магнітний потік Φ . Замикаючись у магнітопроводі, цей потік зчіплюється з обома обмотками (первинною і вторинною) і індукуює у них ЕРС:

у первинній обмотці ЕРС самоіндукції

$$e_1 = -W_1(d\Phi/dt), \quad (3.1)$$

у вторинній обмотці ЕРС взаємоіндукції

$$e_2 = -W_2(d\Phi/dt), \quad (3.2)$$

де W_1 і W_2 – число витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора.

При підключенні навантаження Z_n до виводів вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС e_2 у колі цієї обмотки створюється струм i_2 , а на виводах вторинної обмотки встановлюється напруга U_2 . У підвищувальних трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижувальних $U_2 < U_1$.

З (3.1) і (3.2) видно, що ЕРС e_1 і e_2 , які наводяться в обмотках трансформатора, відрізняються одне від одного лише різним числом витків W_1 і W_2 в обмотках, тому, застосовуючи обмотки з необхідним співвідношенням витків, можна виготовити трансформатор практично на будь-яке відношення напруг.

Обмотку трансформатора, підключену до мережі з більш високою напругою, називають обмоткою вищої напруги (ВН); обмотку, приєднану до мережі меншої напруги, — обмоткою нижчої напруги (НН).

На рисунку 3.1, б показане зображення однофазного трансформатора на принципових електричних схемах.

Трансформатори мають властивість оборотності: той самий трансформатор можна використовувати в якості підвищувального і понижувального. Але звичайно трансформатор має певне призначення: або він підвищувальний, або понижувальний.

Трансформатор – це апарат змінного струму. Якщо ж його первинну обмотку підключити до джерела постійного струму, то магнітний потік у магнітопроводі трансформатора також буде постійним як за величиною, так і за напрямком $[(d\Phi/dt)=0]$, тому в обмотках трансформатора не буде наводитися ЕРС, а отже, електроенергія з первинного кола не буде передаватися у вторинне.

Властивості трансформатора визначаються його номінальними параметрами, до яких відносяться: 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 і номінальній первинній напрузі), В або кВ; 3) номінальні лінійні струми в первинній $I_{1ном}$ і вторинній $I_{2ном}$ обмотках, А; 4) номінальна повна потужність $S_{ном}$, кВ·А (для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном}$, для трифазного – $S_{ном} = \sqrt{3} U_{1ном} I_{1ном}$).

Номінальні лінійні струми обчислюють за номінальною потужністю трансформатора: для трифазного трансформатора

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном} 10^3}{\sqrt{3} U_{1ном}}; \quad (3.3)$$

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном} 10^3}{\sqrt{3} U_{2ном}}, \quad (3.4)$$

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

Кожний трансформатор розрахований для включення в мережу змінного струму певної частоти. Трансформатори загального призначення розраховані на частоту $f = 50$ Гц (у деяких інших країнах $f = 60$ Гц), у пристроях автоматики і зв'язку застосовують трансформатори на частоти 50, 400 або 1000 Гц.

3.2 РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ТРАНСФОРМАТОРА

Основні рівняння трансформатора

Основний змінний магнітний потік Φ у магнітопроводі трансформатора, зчіплюючись із витками обмоток w_1 і w_2 (рис. 3.2), наводить у них ЕРС [див. (3.1) і (3.2)]

$$e_1 = -W_1(d\Phi/dt); e_2 = -W_2(d\Phi/dt).$$

Припустимо, що магнітний потік Φ є синусоїдальною функцією часу, тобто

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t, \quad (3.5)$$

де $\Phi_{\max}$ – максимальне значення потоку.

Тоді, підставивши (3.5) у формулу ЕРС e_1 і провівши диференціювання, одержимо

$$e_1 = -\omega W_1 \Phi_{\max} \cos \omega t. \quad (3.6)$$

Але оскільки $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$, то

$$e_1 = \omega W_1 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2). \quad (3.7)$$

За аналогією

$$e_2 = \omega W_2 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2). \quad (3.8)$$

З (3.7) і (3.8) видно, що ЕРС e_1 і e_2 відстають по фазі від потоку Φ на кут $\pi/2$. Максимальне значення ЕРС

$$E_{1\max} = \omega W_1 \Phi_{\max}. \quad (3.9)$$

Розділивши $E_{1\max}$ на $\sqrt{2}$ і підставивши $\omega = 2\pi f$, одержимо діюче значення первинної ЕРС (В)

$$E_1 = E_{1\max} / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) W_1 f \Phi_{\max} = 4,44 W_1 f \Phi_{\max}. \quad (3.10)$$

Аналогічно, для вторинної ЕРС

$$E_2 = 4,44 W_2 f \Phi_{\max}. \quad (3.11)$$

Відношення ЕРС обмотки вищої напруги до ЕРС обмотки нижчої напруги називають коефіцієнтом трансформації

$$k = E_1 / E_2 = W_1 / W_2. \quad (3.12)$$

При практичних розрахунках коефіцієнт трансформації з деяким допущенням приймають рівним відношенню номінальних напруг обмоток ВН і НН

$$k \approx U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}}.$$

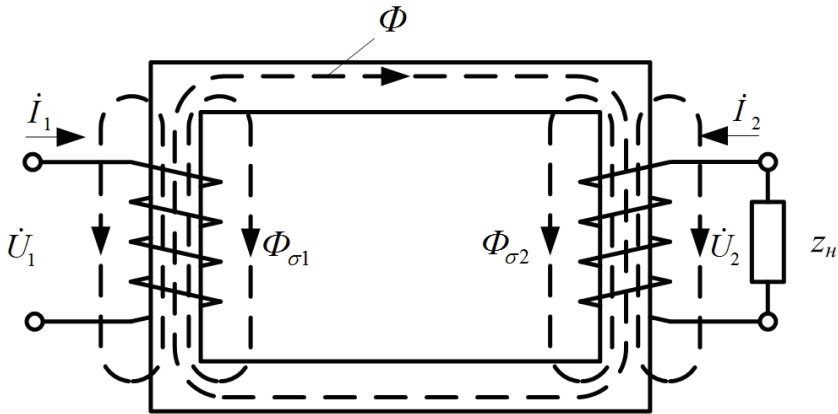


Рис. 3.2 – Магнітні потоки в однофазному трансформаторі

Струми I_1 і I_2 в обмотках трансформатора крім основного магнітного потоку Φ створюють магнітні потоки розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$ й $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 3.2), кожний з яких зчеплений з витками лише власної обмотки і індукує у ній ЕРС розсіювання. Ці ЕРС у первинній і вторинній обмотках мають такі значення

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1}(di_1 / dt); e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2}(di_2 / dt),$$

де $L_{\sigma 1}$ і $L_{\sigma 2}$ – індуктивності розсіювання.

Оскільки магнітні потоки розсіювання замикаються головним чином у немагнітному середовищі, магнітна проникність якої постійна, то і індуктивності $L_{\sigma 1}$ і $L_{\sigma 2}$ можна вважати постійними.

Діючі значення ЕРС розсіювання пропорційні струмам у відповідних обмотках:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1; \dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 x_2,$$

де x_1 і x_2 – індуктивні опори розсіювання первинної і вторинної обмоток відповідно, Ом (знак мінус у цих виразах свідчить про реактивність ЕРС розсіювання).

Таким чином, у кожній з обмоток трансформатора індукуються по дві ЕРС: ЕРС від основного потоку Φ і ЕРС від потоку розсіювання ($\Phi_{\sigma 1}$ у первинній обмотці і $\Phi_{\sigma 2}$ у вторинній обмотці).

Для первинного кола трансформатора, ввімкненого в мережу на напругу U_1 , з урахуванням падіння напруги в активному опорі

первинної обмотки r_1 можна записати рівняння напруг згідно з другим законом Кірхгофа

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1,$$

або, після перенесення ЕРС $\dot{E}_1$ і $\dot{E}_{\sigma 1}$ в праву частину рівняння і виразивши ЕРС розсіювання через індуктивний опір розсіювання x_1 , одержимо рівняння напруг для первинного кола трансформатора:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1. \quad (3.13)$$

ЕРС первинної обмотки E_1 , наведена основним магнітним потоком Φ , – це ЕРС самоіндукції, а тому перебуває у протифазі з підведеною до первинної обмотки напругою U_1 .

Звичайно індуктивне $j\dot{I}_1 x_1$ і активне $\dot{I}_1 r_1$ падіння напруги невеликі, а тому з деяким наближенням можна вважати, що підведена до трансформатора напруга U_1 врівноважується ЕРС E_1 , тобто

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1). \quad (3.14)$$

Для вторинного кола трансформатора, замкнутого на навантаження з опором Z_n , рівняння напруг має вигляд

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n \quad (3.15)$$

тобто сума ЕРС, наведених у вторинній обмотці $(\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2})$, урівноважується сумою падінь напруг $(\dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n)$, де r_2 – активний опір вторинної обмотки. Падіння напруги на навантаженні $\dot{I}_2 Z_n$ – це напруга на виводах вторинної обмотки трансформатора:

$$\dot{I}_2 Z_n = U_2. \quad (3.16)$$

Приведемо рівняння (3.15) до виду, аналогічного рівнянню ЕРС для первинного кола (3.13). При цьому врахуємо вираз (3.14) і (3.16) і одержимо рівняння напруг для вторинного кола трансформатора:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{I}_2 Z_n. \quad (3.17)$$

Із цього рівняння видно, що напруга на виході навантаженого трансформатора відрізняється від ЕРС вторинної обмотки на величину падіння напруг у цій обмотці.

Припустимо, що трансформатор працює в режимі холостого ходу (рис. 3.3, а), тобто до затискачів його первинної обмотки підведена напруга U_1 , а вторинна обмотка розімкнута ($U_2 = 0$). Струм I_0 у первинній обмотці при цих умовах називають струмом холостого ходу.

Магніторухійна сила (МРС) $I_0 W_1$, створена цим струмом, наводить у магнітопроводі трансформатора основний магнітний потік, максимальне значення якого

$$\Phi_{\max} = \frac{\sqrt{2} I_0 W_1}{R_m}, \quad (3.18)$$

де R_m – магнітний опір магнітопроводу.

При замиканні вторинної обмотки на навантаження Z_n (рис. 3.3, б) у ній виникає струм I_2 . При цьому струм у первинній обмотці збільшується до значення I_1 .

Тепер потік $\Phi_{\max}$ створюється діями МРС $I_1 W_1$ і $I_2 W_2$

$$\Phi_{\max} = \left(\sqrt{2} / R_m \right) (I_1 W_1 + I_2 W_2). \quad (3.19)$$

Цей потік можна визначити з (3.10):

$$\Phi_{\max} = E_1 / (4,44 W_1 f),$$

або, враховуючи, що $U_1 \approx (-E_1)$, одержимо

$$\Phi_{\max} \approx U_1 / (4,44 W_1 f). \quad (3.20)$$

З (3.20) видно, що значення основного магнітного потоку Φ практично не залежить від навантаження трансформатора, тому що напруга U_1 незмінна. Однак варто мати на увазі, що це положення є наближенням і відноситься до випадків навантаження, що не перевищує номінальне. Пояснюється це тим, що положення про незмінність потоку Φ прийнято на підставі рівняння $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, що не враховує спаду напруги в первинному колі [з рівняння (3.14)].

Прийняте положення $\Phi = \text{const}$ дозволяє прирівняти вирази (3.19) і (3.20):

$$\left(\sqrt{2} / R_m \right) \dot{I}_0 W_1 = \left(\sqrt{2} / R_m \right) (\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2)$$

і одержати рівняння МРС трансформатора:

$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2. \quad (3.21)$$

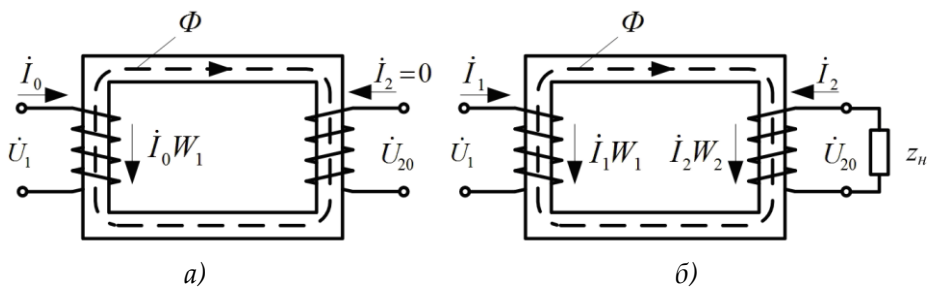


Рис. 3.3. – Режими холостого ходу (а) і навантаження (б) в однофазному трансформаторі

Перетворюючи (3.21), можна МРС первинної обмотки $-\dot{I}_2 W_2$ представити у вигляді суми двох складових:

$$\dot{I}_1 W_1 = \dot{I}_0 W_1 + (-\dot{I}_2 W_2)$$

Складова $\dot{I}_0 W_1$ наводить у магнітопроводі трансформатора основний магнітний потік Φ , а складова $\dot{I}_2 W_2$ врівноважує МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$.

Вплив МРС вторинної обмотки трансформатора $\dot{I}_2 W_2$ на основний магнітний потік Φ можна пояснити за допомогою правила Ленца. Відповідно до цього правила наведена в обмотці ЕРС створює в ній такий струм, що своєю магнітною дією спрямований проти причини, що викликала появу цієї ЕРС. Причиною наведення ЕРС E_2 у вторинній обмотці трансформатора є основний магнітний потік Φ , тому струм у вторинній обмотці I_2 створює МРС $\dot{I}_2 W_2$, спрямовану зустрічно потоку Φ , тобто перебуває з ним у протифазі і прагне послабити цей потік. Якби обмотка W_2 була замкнута накоротко або на чисто індуктивний опір і при цьому не мала активного опору, то струм $\dot{I}_2$ відставав би по фазі від ЕРС $\dot{E}_2$ на кут $\Psi_2 = 90^\circ$ і вся МРС $\dot{I}_2 W_2$ розмагнічувала магнітопровід. Але в реальних умовах вторинна обмотка замкнута на опір навантаження $Z_n = r_n \pm jx_n$, та ще й сама має активний опір r_2 . Тому фазовий зсув струму $\dot{I}_2$ від ЕРС $\dot{E}_2$ відрізняється від 90° і з основним магнітним потоком Φ взаємодіє не вся МРС $\dot{I}_2 W_2$, а лише її реактивна складова.

При активно-індуктивному навантаженні, коли $Z_n = r_n \pm jx_n$ і струм навантаження $\dot{I}_2$ відстає по фазі від ЕРС вторинної обмотки E_2 на кут

Ψ_2 , МРС $\dot{I}_2 W_2$ своєю реактивною (індуктивною) складовою $\dot{I}_{2p} W_2$ розмагнічує магнітопровід:

$$\dot{I}_{2p} W_2 = \dot{I}_2 W_2 \sin \Psi_2,$$

де $\dot{I}_{2p} = \dot{I}_2 \sin \Psi_2$ – реактивна складова струму навантаження.

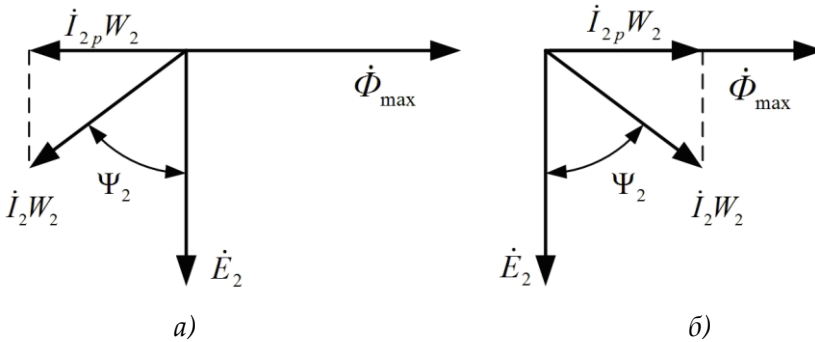


Рис. 3.4 – Векторна діаграма МРС трансформатора при активно-індуктивному (а) та активно-ємнісному (б) навантаженнях

На рисунку 3.4, а представлена векторна діаграма МРС для випадку активно-індуктивного навантаження трансформатора. На діаграмі вектор ЕРС вторинної обмотки $\dot{E}_2$ відстає по фазі від вектора основного магнітного потоку Φ_{max} на кут 90° , а вектор МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$ відстає по фазі від ЕРС E_2 на кут Ψ_2 (рис. 3.4, а). З виконаних на цій діаграмі побудов видно, що реактивна (індуктивна) складова МРС вторинної обмотки $\dot{I}_{2p} W_2$ перебуває в протифазі з основним магнітним потоком Φ_{max} , тобто розмагнічує магнітопровід трансформатора.

Аналізуючи роботу трансформатора, необхідно відзначити, що при навантаженні трансформатора в межах номінального значення основний магнітний потік Φ майже не змінюється і прийняте раніше положення $\Phi \approx const$ цілком припустимо. Відбувається це тому, що МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$, реактивна складова якої розмагнічує магнітопровід, компенсується складовою первинної МРС:

$$(-\dot{I}_2 W_2) = \dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_0 W_1. \quad (3.22)$$

При коливаннях струму навантаження трансформатора $\dot{I}_2$ змінюється МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$, а це викликає відповідні

зміни МРС первинної обмотки $\dot{I}_1 W_1$ за рахунок її складової – $\dot{I}_2 W_2$. Що ж стосується складової МРС холостого ходу $\dot{I}_0 W_1$, то її значення залишається практично незмінним, достатнім для створення в магнітопроводі трансформатора основного магнітного потоку $\Phi \approx const$.

При активно-ємнісному навантаженні трансформатора, коли $Z_n = r_n \pm jx_n$ і струм навантаження $\dot{I}_2$ випереджає по фазі ЕРС $\dot{E}_2$ на кут Ψ_2 , реактивна (ємнісна) складова МРС вторинної обмотки $\dot{I}_{2\rho} W_2$ співпадає по фазі з основним магнітним потоком Φ_{max} і підмагнічує магнітопровід трансформатора (рис. 3.4, б). У цьому випадку, так само як і при активно-індуктивному навантаженні (3.24), складова первинної МРС ($-\dot{I}_2 W_2$) компенсує дію вторинної МРС $\dot{I}_2 W_2$.

Розділивши рівняння МРС (3.21) на число витків W_1 , одержимо

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 W_2 / W_1, \text{ або } \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2', \quad (3.23)$$

де $\dot{I}_2' = \dot{I}_2 W_2 / W_1$, – струм навантаження (вторинний струм), приведений до числа витків первинної обмотки.

Інакше кажучи, це такий струм, що в обмотці із числом витків W_1 створює таку ж МРС, що і струм I_2 у вторинній обмотці W_2 , тобто $I_2' W_1 = I_2 (W_2 / W_1) W_1 = I_2 W_2$.

Перетворивши вираз (3.23), одержимо рівняння струмів трансформатора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'). \quad (3.24)$$

Із цього рівняння видно, що первинний струм I_1 можна розглядати як суму двох складових: складову I_0 , що створює МРС $I_0 W_1$, необхідну для наведення в магнітопроводі основного магнітного потоку Φ , і складову $-I_2'$, що створює МРС $-I_2' W_1$ і компенсує МРС вторинної обмотки $I_2 W_2$ трансформатора. Така дія складових первинного струму приводить до того, що будь-яка зміна струму навантаження I_2 супроводжується зміною первинного струму I_1 за рахунок зміни його складової – I_2' , що перебуває в протифазі зі струмом навантаження I_2 .

Основний магнітний потік Φ є змінним, а тому магнітопровід трансформатора піддається систематичному перемагнічуванню. Внаслідок цього в магнітопроводі трансформатора мають місце магнітні втрати від гістерезису і вихрових струмів, що наводяться змінним магнітним потоком у пластинах електротехнічної сталі. Потужність магнітних втрат еквівалентна активній складовій струму

х.х. Таким чином, струм х.х. має дві складові: реактивну I_{0p} – струм, що намагнічує, і активну I_{0a} , обумовлену магнітними втратами:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (3.25)$$

Зазвичай активна складова струму х.х. невелика і не перевищує 0,10 від I_0 , тому вона суттєво не впливає на струм х.х.

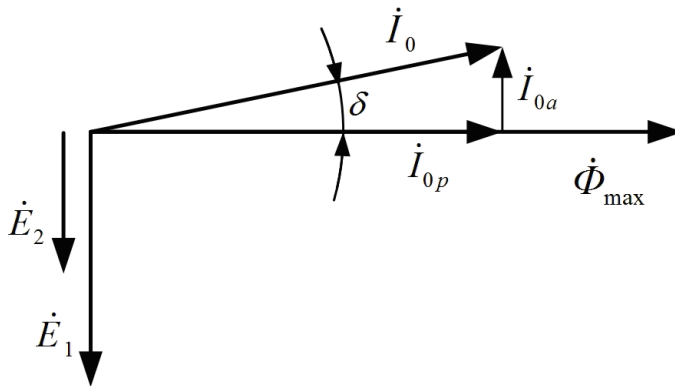


Рис. 3.5 – Розкладання струму х.х. на складові

На рисунку 3.5 представлена векторна діаграма, на якій зображені вектори струму х.х. I_0 і його складові $\dot{I}_{0a}$ і $\dot{I}_{0p}$. Кут δ , на який вектор основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_{max}$ відстає по фазі від струму $\dot{I}_0$, називають кутом магнітних втрат. Неважко помітити, що цей кут збільшується з ростом активної складової струму х.х. $\dot{I}_{0a}$, тобто з ростом магнітних втрат у магнітопроводі трансформатора.

Сила струму х.х. у трансформаторах великої і середньої потужності відповідно становить 2–10% від номінального первинного струму. Тому при навантаженні, близькому до номінального, нехтуючи струмом I_0 і перетворюючи (3.21), одержимо

$$I_1 / I_2 = W_2 / W_1, \quad (3.26)$$

тобто струми в обмотках трансформатора обернено пропорційні числам витків цих обмоток: струм більше в обмотці з меншим числом витків і менше в обмотці з більшим числом витків. Тому обмотки НН виконують проводом більшого перетину, ніж обмотки ВН, що мають більше число витків.

Приведення параметрів вторинної обмотки і 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 ускладнює розрахунки і побудову векторних діаграм, оскільки в цьому випадку довжина векторів електричних величин первинної обмотки значно відрізняється від довжини однойменних векторів вторинної обмотки. Зазначені труднощі можна усунути приведенням всіх параметрів трансформатора до однакового числа витків, зазвичай до числа витків первинної обмотки W_1 . З цією метою всі величини, що характеризують вторинне коло трансформатора, – ЕРС, напругу, струм і 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 приведеним. Однак приведення вторинних параметрів трансформатора не повинне позначитися на його енергетичних показниках: всі потужності і фазові зсуви у вторинній обмотці приведенного трансформатора повинні залишитися такими, як і в реальному трансформаторі.

Так, електромагнітна потужність вторинної обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ повинна дорівнювати електромагнітній потужності вторинної обмотки приведенного трансформатора:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2. \quad (3.27)$$

Підставивши значення наведеного струму вторинної обмотки $I_2 = I_2(W_2/W_1)$ в (3.27), одержимо формулу приведенної вторинної ЕРС:

$$E'_2 = \frac{I_2}{I'_2} E_2 = \frac{I_2}{I_2} \frac{W_1}{W_2} E_2 = E_2 \frac{W_1}{W_2}. \quad (3.28)$$

Оскільки $U_2 I_2 \approx U'_2 I'_2$, то приведена напруга вторинної обмотки

$$U'_2 \approx U_2 (W_1/W_2). \quad (3.29)$$

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

$$r'_2 = r_2 (I_2 / I'_2)^2 = r_2 (W_1 / W_2)^2. \quad (3.30)$$

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

$$x_2' = x_2 (W_1 / W_2)^2. \quad (3.31)$$

Приведений повний опір вторинної обмотки трансформатора

$$Z_2' = r_2' + jx_2' = (r_2 + jx_2)(W_1 / W_2)^2 = Z_2 (W_1 / W_2)^2. \quad (3.32)$$

Приведений повний опір навантаження, підключеного до виводів вторинної обмотки, визначимо за аналогією з (3.32):

$$Z_n' = Z_n (W_1 / W_2)^2. \quad (3.33)$$

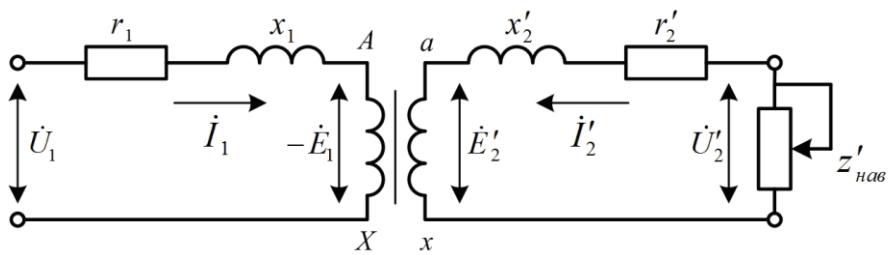
Рівняння напруг і струмів для приведенного трансформатора мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2'; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'). \end{aligned} \quad (3.34)$$

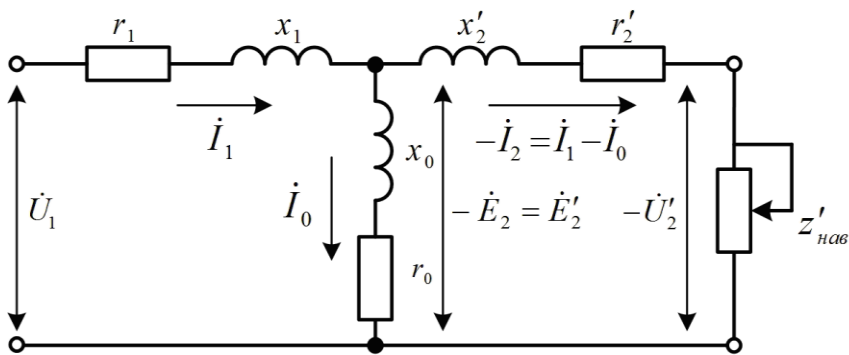
Ці рівняння встановлюють аналітичний зв'язок між параметрами трансформатора у всьому діапазоні навантажень від режиму х.х. до номінального.

Ще одним засобом, що полегшує дослідження електромагнітних процесів і розрахунків трансформаторів, є застосування електричної схеми заміщення приведенного трансформатора. На рисунку 3.6, а представлена еквівалентна схема приведенного трансформатора, на якій опори r і x умовно винесені з відповідних обмоток і включені послідовно їм.

Як було встановлено раніше, у приведеному трансформаторі $k = 1$, а тому $-\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$. У результаті точки A і a , а також X і x на схемі мають однакові потенціали, що дозволяє електрично з'єднати зазначені точки, одержавши Т-подібну схему заміщення приведенного трансформатора (рис. 3.6, б). В електричній схемі заміщення трансформатора магнітний зв'язок між колами замінено електричним.



а)



б)

Рис. 3.6 – Еквівалентна схема (а) і схема заміщення (б) приведенного трансформатора

Схема заміщення приведенного трансформатора задовольняє всім рівнянням ЕРС і струмів приведенного трансформатора (3.34) і є сукупність трьох кіл: первинного – з опором $Z_1 = r_1 + jx_1$ і струмом $\dot{I}_1$; що намагнічує – опором $Z_0 = r_0 + jx_0$ і струмом $\dot{I}_0$; вторинного – із двома опорами: опором вторинної обмотки $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ і опором навантаження $Z'_{наб} = r'_n \pm jx'_n$ і струмом $-\dot{I}_2$. Зміною опору навантаження $Z'_{наб}$ на схемі заміщення можуть бути відтворені всі режими роботи трансформатора.

Параметри кола намагнічування $Z_0 = r_0 + jx_0$ визначаються струмом х.х. Наявність у цьому колі активної складової r_0 обумовлено магнітними втратами в трансформаторі.

Всі параметри схеми заміщення, за винятком $Z'_{наб}$, є постійними для даного трансформатора і можуть бути визначені з досліду х.х. і досліду к.з.

Векторна діаграма трансформатора

Скориставшись схемою заміщення приведенного трансформатора і основними рівняннями напруг і струмів (3.34), побудуємо векторну діаграму трансформатора, що наочно показує співвідношення і фазові зсуви між струмами, ЕРС і напругами трансформатора. Векторна діаграма – графічне вираження основних рівнянь приведенного трансформатора (3.34).

Побудова діаграми (рис. 3.7, а) варто починати з вектора максимального значення основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_{\max} = E_1 / (4,44 f W_1)$.

Вектор струму $\dot{I}_0$ випереджає по фазі вектор потоку $\dot{\Phi}_{\max}$ на кут δ , а вектори ЕРС $\dot{E}'_1$ і $\dot{E}'_2$ відстають від цього вектора на кут 90° [див. (3.5) і (3.7)]. Далі будуємо вектор $\dot{I}'_2$. Для визначення кута зсуву фаз між $\dot{E}'_2$ і $\dot{I}'_2$ треба знати характер навантаження. Припустимо, що навантаження трансформатора активно-індуктивне. 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.

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_n}{r'_2 + r'_n}, \quad (3.35)$$

Для побудови вектора вторинної напруги $\dot{U}'_2$ необхідно з вектора ЕРС $\dot{E}'_2$ відняти вектори спадань напруги $j\dot{I}'_2 x'_2$ і $\dot{I}'_2 r'_2$. Із цією метою з кінця вектора $\dot{E}'_2$ опускаємо перпендикуляр на напрямок вектора струму $\dot{I}'_2$ і 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 колі. Потім із цієї точки проводимо вектор $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$, що випереджає по фазі струм $\dot{I}'_2$ на кут $\varphi_2 = \arctg(x'_n / r'_n)$.

Вектор первинного струму будуємо 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 $\dot{I}'_2$.

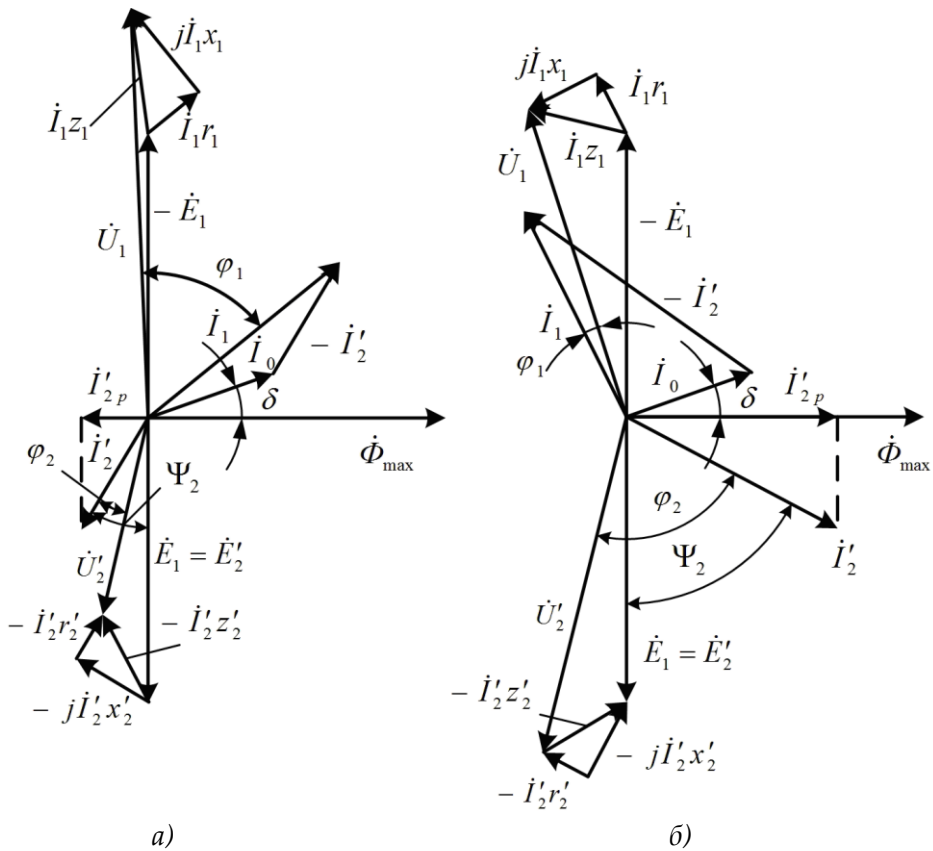


Рис. 3.7 – Векторні діаграми трансформатора при активно-індуктивному (а) і активно-ємнісному (б) навантаженнях

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 $\Phi_{\max}$ 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 $\dot{U}'_2$ і $\dot{I}'_2$, а потім будують вектори цих величин під фазовим кутом φ_2 одне від

одного. Вектор ЕРС $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ одержують геометричним додаванням вектора напруги $\dot{U}'_2$ із падіннями 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 3.7, б. Порядок побудови діаграми залишається таким же, але вид її трохи змінюється. Струм $\dot{I}'_2$ у цьому випадку випереджає по фазі ЕРС $\dot{E}'_2$ на кут

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 - x'_n}{r'_2 + r'_n}. \quad (3.36)$$

При значній ємнісній складовій навантаження падіння напруги в ємнісних складових опорі навантаження і індуктивне падіння напруги розсіювання у вторинній обмотці частково компенсують одне одного. У результаті напруга $\dot{U}'_2$ може виявитися більше, ніж ЕРС $\dot{E}'_2$. Крім того, реактивна (випереджувальна) складова вторинного струму $\dot{I}'_{2p} = \dot{I}'_2 \sin \psi_2$ збігається по фазі з реактивною складовою струму х.х. $\dot{I}_{0p}$, тобто підмагнічує магнітопровід трансформатора.

Це веде до зменшення первинного струму $\dot{I}_1$, у порівнянні з його значенням при активно-індуктивному навантаженні, коли впливає складова $\dot{I}'_{2p}$ (рис. 3.7, а).

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 магнітопроводу $\Phi = f(i_{0p})$ і графіком зміни потоку $\Phi = f(t)$.

На рисунку 3.8, а наведено побудову графіка струму, що намагнічує, $i_0 = f(t)$. Тут у лівому верхньому квадранті показана синусоїдальна крива $\Phi = f(t)$, а у верхньому правому квадранті – крива намагнічування

$\Phi = f(i_{0p})$ матеріалу магнітопроводу. Побудову графіка струму, що намагнічує, $i_0 = f(t)$, розташованого в правому нижньому квадранті, виконують наступним чином. На графіку $\Phi = f(t)$ вибирають ряд точок 1, 2, 3, проєктують їх на криву намагнічування і визначають величину струму, що намагнічує, який відповідає обраним значенням магнітного потоку. Потім проводять вертикальні лінії через точки 1, 2, 3 на осі i_{0p} у правий нижній квадрант до перетину з горизонтальними лініями, проведеними із точок 1, 2, 3 на осі часу цього квадранта, і одержують геометричне місце точок кривої струму, що намагнічує, $i_0 = f(t)$. Зі зроблених побудов видно, що при синусоїдальній формі кривої $\Phi = f(t)$ струм, що намагнічує, має шпильасту форму. З метою спрощення побудов в даному випадку скористалися кривою намагнічування $\Phi = f(i_{0p})$, побудованої без врахування впливу гістерезису.

Після розкладання несинусоїдальної кривої струму i_{0p} на синусоїдальні складові (рис. 3.8, 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 складає приблизно 30% амплітуди основної гармоніки струму, що намагнічує. Вище викладане відноситься лише до реактивної складової струму х.х., оскільки активна складова i_{0a} є синусоїдальною. Зазвичай i_{0a} не перевищує 10% від I_0 , тому з деяким наближенням можна прийняти, що крива струму х.х. $i_0 = f(t)$ не відрізняється від кривої $i_{0p} = f(t)$.

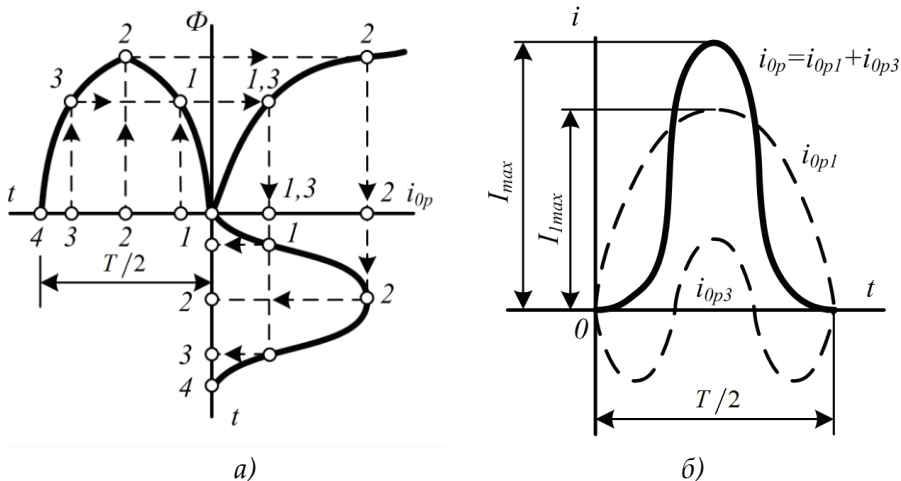


Рис. 3.8 – Побудова графіка струму, що намагнічує (а) і розкладання його на складові (б)

З рівнянь струмів третьої гармоніки в трифазній системі

$$\left. \begin{aligned} i_{A3} &= I_{3\max} \sin 3\omega t; \\ i_{B3} &= I_{3\max} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t; \\ i_{C3} &= I_{3\max} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t; \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

видно, що ці струми в будь-який момент часу збігаються по фазі, тобто мають однаковий напрямок. 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 осердя при трансформованні трифазного струму.

Розглянемо особливості режиму холостого ходу трифазних трансформаторів для деяких схем з'єднання обмоток.

З'єднання Y/Y_0 . Якщо напругу підводять із боку обмоток, з'єднаних зіркою без нульового виводу (рис. 3.9, а), то струми третьої гармоніки (і кратні трьом – 9, 15 і т.д.), збігаються по фазі у всіх трьох фазах і дорівнюють нулю. Пояснюється це відсутністю нульового проводу, а отже, відсутністю виходу з нульової точки. В результаті струми третьої і кратні третій гармоніки будуть взаємно компенсуватися і струм, що намагнічує, трансформатора виявиться синусоїдальним, але магнітний потік у магнітопроводі буде несинусоїдальним (сплюсненим) з явно вираженим потоком третьої гармоніки Φ_3 (рис. 3.10).

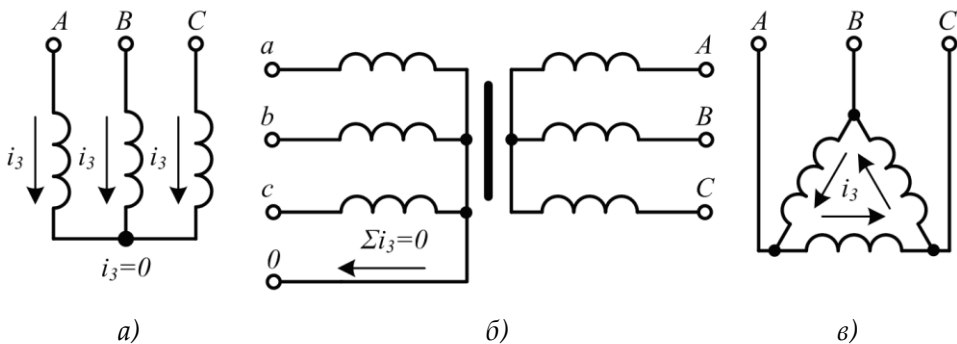


Рис. 3.9 – Напрямок струмів третьої гармоніки для різних схем з'єднання обмоток

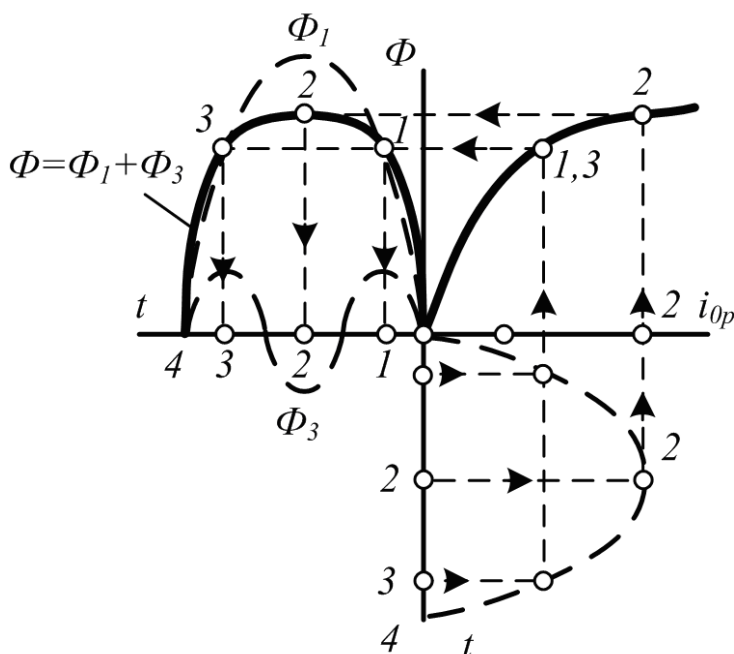


Рис. 3.10 – Побудова графіка магнітного потоку при синусоїдальній формі струму, що намагнічує

Потоки третьої гармоніки не можуть замкнутися в тристрижневому магнітопроводі, оскільки збігаються по фазі, тобто спрямовані зустрічно. Ці потоки замикаються через повітря (масло) і металеві стінки бака (рис. 3.11). Великий магнітний опір потоку Φ_3 послаблює його величину, тому наведена потоками Φ_3 у фазних обмотках ЕРС третьої гармоніки невелика і звичайно її амплітуда не перевищує 5–7% від амплітуди основної гармоніки. На практиці потік Φ_3 враховують лише з погляду втрат від вихрових струмів, що індукуються цим потоком у стінках бака. Наприклад, при індукції в стрижні магнітопроводу порядку 1,4 Тл втрати від вихрових струмів у баку становлять близько 10% від втрат у магнітопроводі, а при індукції 1,6 Тл ці втрати зростають до 50–65%.

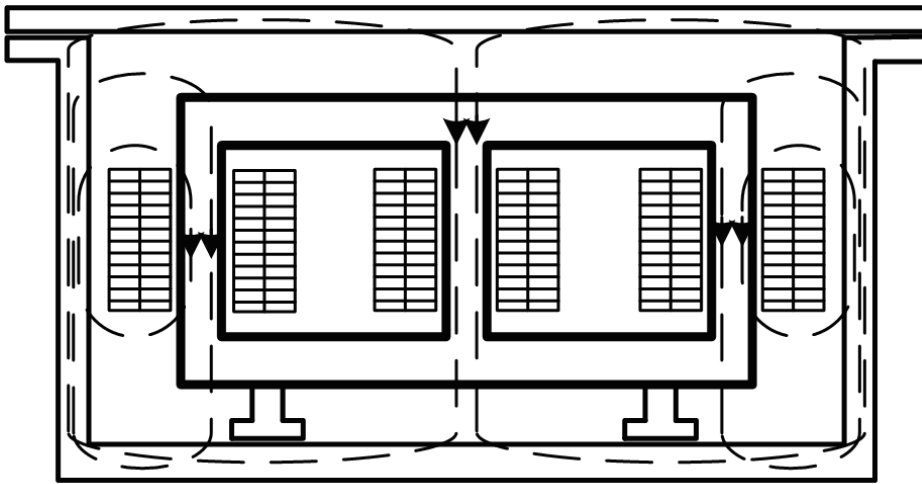


Рис. 3.11 – Шляхи замикання магнітних потоків третьої гармоніки у трестрижневому магнітопроводі

У випадку трансформаторної групи, що складається із трьох однофазних трансформаторів, магнітопроводи окремих фаз магнітно не зв'язані, тому магнітні потоки третьої гармоніки всіх трьох фаз без перешкод 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 і третю Φ_3 ,

$$\Phi = \Phi_1 \sin \omega t + \Phi_3 \sin 3\omega t \quad (3.38)$$

наводить у фазних обмотках несинусоїдальну ЕРС

$$e = -Wd\Phi / dt = \omega W\Phi_1 \sin(\omega t - \pi / 2) + 3\omega W\Phi_3 \sin(3\omega t - \pi / 2) = e_1 + e_3 \quad (3.39)$$

Підвищена частота 3ω магнітного потоку Φ_3 приводить до появи значної ЕРС e_3 , що різко збільшує амплітудне значення фазної ЕРС обмотки при тому ж діючому її значенні (рис. 3.12), що створює несприятливі умови для електричної ізоляції обмоток.

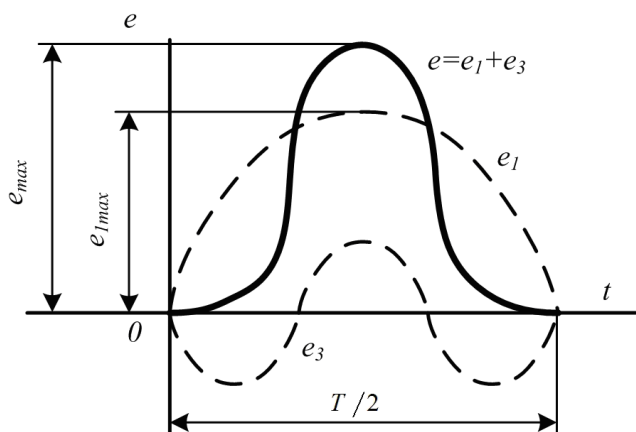


Рис. 3.12 – Форма графіка фазної ЕРС трансформаторної групи при з'єднанні обмоток Y/Y

Амплітуда ЕРС третьої гармоніки в трансформаторній групі може досягати 45–65% від амплітуди основної гармоніки. Однак слід зазначити, що лінійні ЕРС (напруги) залишаються синусоїдальними і не містять третьої гармоніки, тому що при з'єднанні обмоток зіркою фазні ЕРС e_{3A} , e_{3B} і e_{3C} , збігаючись по фазі, не створюють лінійної ЕРС. Пояснюється це тим, що лінійна ЕРС при з'єднанні обмоток зіркою визначається різницею фазних ЕРС. Так, для основної гармоніки (рис. 3.13, а) лінійна ЕРС

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

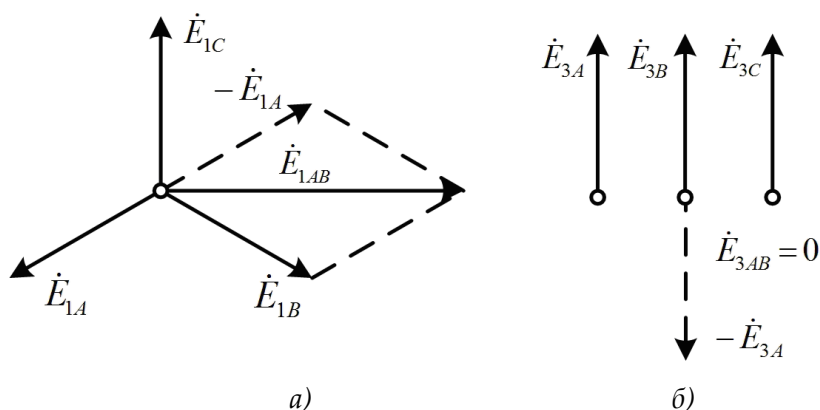


Рис. 3.13 – Векторні діаграми ЕРС основної (а) і третьої (б) гармонік трифазного трансформатора

Що ж стосується лінійної ЕРС третьої і кратних трьом гармонік, то через збіг по фазі фазних ЕРС цих гармонік (рис. 3.13, б) одержимо

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

Якщо первинна обмотка трансформатора є обмоткою НН і її нульовий вивід приєднаний до нульового виводу генератора (рис. 3.9, б), то струми, що намагнічують, фаз містять треті гармоніки. Ці струми збігаються по фазі (3.39), а тому всі вони спрямовані або від трансформатора до генератора, або навпаки. У нульовому проводі буде протікати струм, рівний $3i_3$, при цьому магнітний потік трансформатора, а отже, і ЕРС у фазах будуть синусоїдальні.

З'єднання, при яких обмотки якої-небудь сторони трансформатора (НН або ВН) з'єднані в трикутник. Ці схеми з'єднання найбільш бажані, тому що вони позбавлені недоліків розглянутих вище 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 (рис. 3.9, в). Але якщо струм, що намагнічує, містить третю гармоніку, то 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 $\Phi_{рез3} = \Phi_{13} - \Phi_{23}$ значно послаблюється і практично не впливає на властивості трансформаторів.

Дослідне визначення параметрів схеми заміщення трансформаторів

Отримана електрична схема заміщення (рис. 3.6, б) дозволяє з достатньою точністю досліджувати властивості трансформаторів у будь-якому режимі. Використання цієї схеми при визначенні характеристик має найбільше практичне значення для трансформаторів потужністю 50 кВА і вище, тому що дослідження таких трансформаторів методом безпосереднього навантаження пов'язане з деякими технічними труднощами: непродуктивною витратою електроенергії, необхідністю в громіздкому і дорогому навантажувальному обладнанні.

Визначення параметрів схеми заміщення $Z_1 = r_1 + jx_1$, $Z_m = r_m + jx_m$, $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ можливо або розрахунковим (у процесі розрахунку трансформатора), або дослідним шляхом. Нижче викладається порядок визначення параметрів схеми заміщення трансформатора дослідним шляхом, сутність якого складається в проведенні досліду холостого ходу (х.х.) і досліду короткого замикання (к.з.).

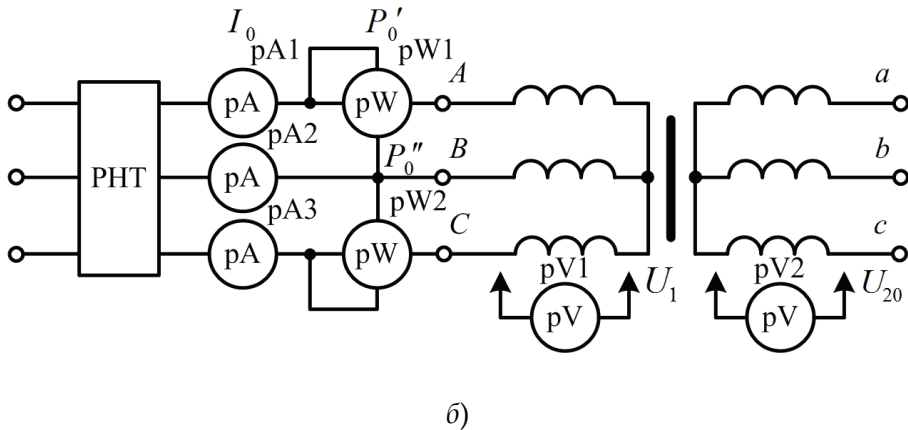
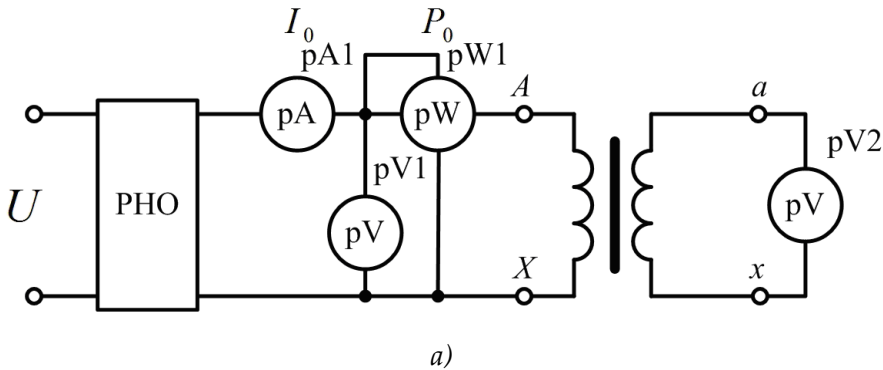
Дослід холостого ходу. Холостим ходом називають режим роботи трансформатора при розімкнутій вторинній обмотці ($Z_H = \infty$, $I_2 = 0$). У цьому випадку рівняння напруг і струмів (3.34) приймають вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Оскільки корисна потужність при роботі трансформатора вхолосту дорівнює нулю, то потужність на вході трансформатора в режимі х.х. P_0 витрачається на магнітні втрати в магнітопроводі P_m , (втрати на перемагнічування магнітопроводу і вихрові струми) і електричні втрати в міді $I_0^2 r_1$, (втрати на нагрівання обмотки при проходженні по ній струму) однієї лише первинної обмотки. Однак через невелике значення струму I_0 , що звичайно не перевищує 2–10% від $I_{ном}$, електричними втратами $I_0^2 r_1$ можна знехтувати і вважати, що вся потужність х.х. – це потужність магнітних втрат у сталі магнітопроводу. Тому магнітні втрати в трансформаторі прийнято називати втратами холостого ходу.

Дослід х.х. однофазного трансформатора проводять за схемою, зображеною на рисунку 3.14, а. Комплект електровимірювальних

приладів, включених у схему, дає можливість безпосереднього виміру напруги U_1 , підведеної до первинної обмотки; напруги U_{20} на виводах вторинної обмотки; потужності х.х. P_0 і струму х.х. I_0 .



**Рис. 3.14 – Схеми дослідів х.х. трансформаторів
однофазного (а), трифазного (б)**

Напругу до первинної обмотки трансформатора звичайно підводять через однофазний регулятор напруги РНО, що дозволяє плавно підвищувати напругу від 0 до $1,15 U_{1ном}$. При цьому через приблизно однакові інтервали струму х.х. знімають показання приладів, а потім будують характеристики х.х.: залежності струму х.х. I_0 , потужності х.х. P_0 і коефіцієнта потужності х.х. $\cos\varphi_0$ від первинної напруги U_1 (рис. 3.15).

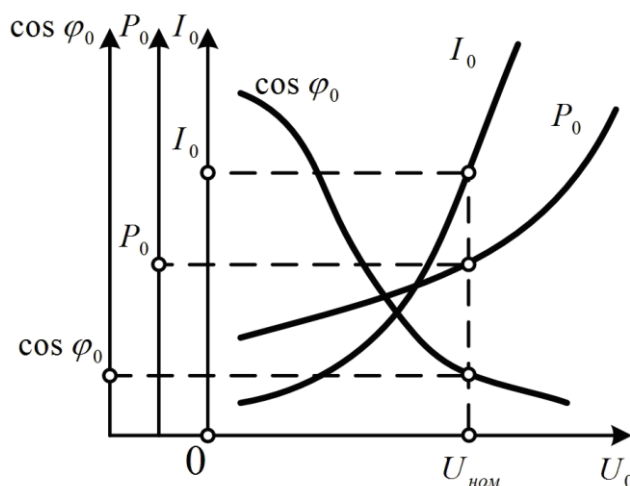


Рис. 3.15 – Характеристики х.х. трансформатора

Криволінійність цих характеристик обумовлена станом магнітного насичення магнітопроводу, що настає при деякому значенні напруги U_1 .

У випадку дослідження холостого ходу із трифазним трансформатором напругу U_1 встановлюють за допомогою трифазного регулятора напруги РНТ (рис. 3.14, б). Характеристики х.х. будують за середнім фазним значенням струму і напруги для трьох фаз:

$$I_0 = (I_{0A} + I_{0B} + I_{0C})/3; \quad (3.41)$$

$$U_1 = (U_{1A} + U_{1B} + U_{1C})/3. \quad (3.42)$$

Коефіцієнт потужності для однофазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0}; \quad (3.43)$$

де P_0' і P_0'' – показання однофазних ватметрів;

U_1 і I_0 – фазні значення напруги і струму.

За даними дослідження х.х. можна визначити: коефіцієнт трансформації

$$k = U_1/U_2 = W_1/W_2;$$

струм х.х. при $U_{1ном}$ (у відсотках від номінального первинного струму)

$$i_0 = (I_{0ном} / I_{1ном}) \cdot 100 \quad (3.44)$$

втрати х.х. P_0 .

У трифазному трансформаторі струми х.х. у фазах неоднакові і утворюють несиметричну систему, тому потужність P_0 варто вимірювати двома ватметрами за схемою, зображеною на рисунку 3.14, б. Падіння напруги в первинній гілці схеми заміщення в режимі х.х. $I_0(r_1 + jx_1)$ (рис. 3.16) становить досить незначну величину, тому, не допускаючи помітної помилки, можна користуватися наступними виразами для розрахунку параметрів гілки намагнічування:

$$z_m = U_1 / I_0$$

$$r_m = z_m \cos \varphi_0$$

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}$$

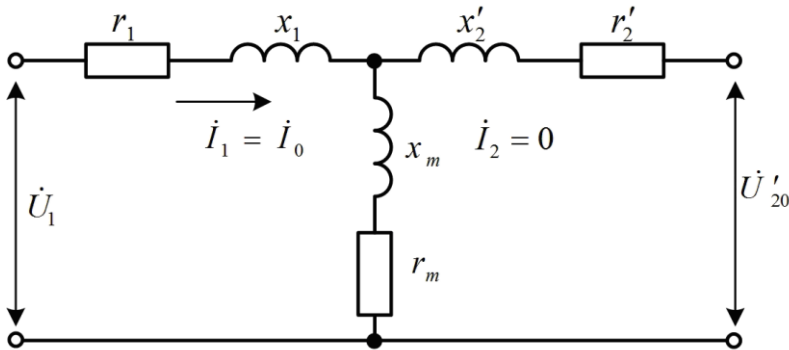


Рис. 3.16 – Схема заміщення трансформатора в режимі х.х.

Зазвичай в силових трансформаторах загального призначення середньої і великої потужності при номінальній первинній напрузі струм х.х. $i_0 = 1,0 \div 6,0\%$.

Якщо ж фактичні значення струму х.х. $I_{0ном}$ і потужності х.х. $P_{0ном}$, що відповідають номінальному значенню первинної напруги $U_{1ном}$, помітно перевищують величини цих параметрів, зазначені в каталозі на даний тип трансформатора, то це свідчить про несправність цього трансформатора: наявність короткозамкнених витків в обмотках або замиканні частини пластин магнітопроводу.

Дослід короткого замикання. Коротке замикання трансформатора – це такий режим, коли вторинна обмотка замкнута накоротко ($z_n = 0$), при цьому вторинна напруга $U_2 = 0$. В умовах експлуатації, коли

до трансформатора підведена номінальна напруга $U_{\text{ном}}$, коротке замикання є аварійним режимом і становить велику небезпеку для трансформатора.

При досліді к.з. обмотку нижчої напруги однофазного трансформатора замикають накоротко (рис. 3.17, а), а до обмотки вищої напруги підводять понижену напругу, поступово підвищуючи її регулятором напруги РНО до деякого значення $U_{\text{к.ном}}$, при якому струми к.з. в обмотках трансформатора стають рівними номінальним струмам у первинній ($I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}}$) і вторинній ($I_{2\text{к}} = I_{2\text{ном}}$) обмотках

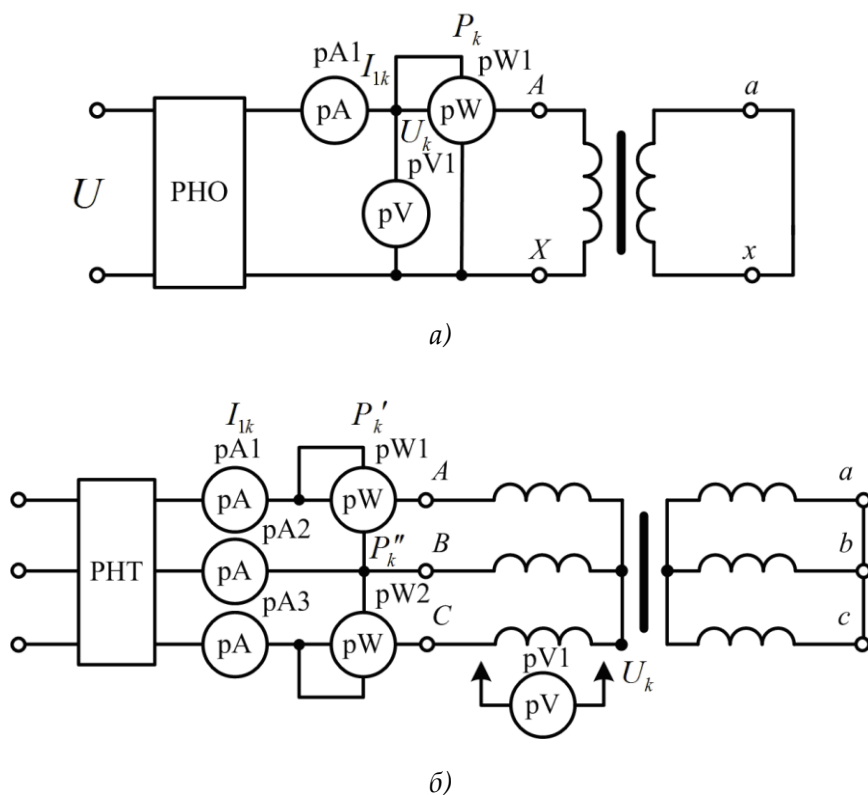


Рис. 3.17 – Схеми дослідів к.з. трансформаторів однофазного (а), трифазного (б)

При цьому знімають показання приладів і будують характеристики к.з., що є залежностями струму к.з. $I_{1\text{к}}$, потужності к.з. $P_{\text{к}}$ і коефіцієнта потужності $\cos\phi_{\text{к}}$ від напруги к.з. $U_{\text{к}}$ (рис. 3.18).

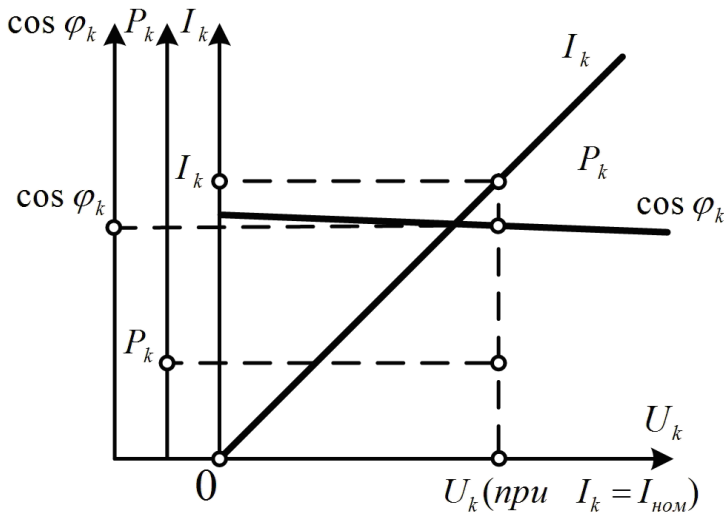


Рис. 3.18 – Характеристики к.з. трансформатора

У випадку трифазного трансформатора дослід проводять за схемою, показаною на рисунку 3.17, б, а значення напруги к.з. і струму к.з. визначають як середні для трьох фаз:

$$U_{\kappa} = (U_{\kappa A} + U_{\kappa B} + U_{\kappa C}) / 3; \quad (3.45)$$

$$I_{1\kappa} = (I_{\kappa A} + I_{\kappa B} + I_{\kappa C}) / 3. \quad (3.46)$$

Коефіцієнт потужності при досліді к.з.

$$\cos \varphi_{\kappa} = P_{\kappa} / (3U_{\kappa} \cdot I_{1\kappa}) \quad (3.47)$$

При цьому активну потужність трифазного трансформатора вимірюють методом двох ватметрів. Тоді потужність к.з.

$$P_{\kappa} = P'_{\kappa} + P''_{\kappa}. \quad (3.48)$$

В (3.48) P'_{κ} і P''_{κ} – показання однофазних ватметрів, Вт.

Напруга, при якій струми в обмотках трансформатора при досліді дорівнюють номінальним значенням, називають номінальною напругою короткого замикання і звичайно виражають у % від номінального:

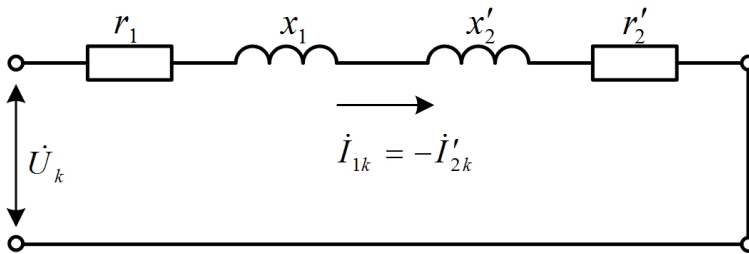
$$u_{\kappa} = (U_{\kappa} / U_{1\text{ном}}) 100 \quad (3.49)$$

Для силових трансформаторів $u_{\kappa} = 5\text{--}10\%$ від $U_{1\text{ном}}$.

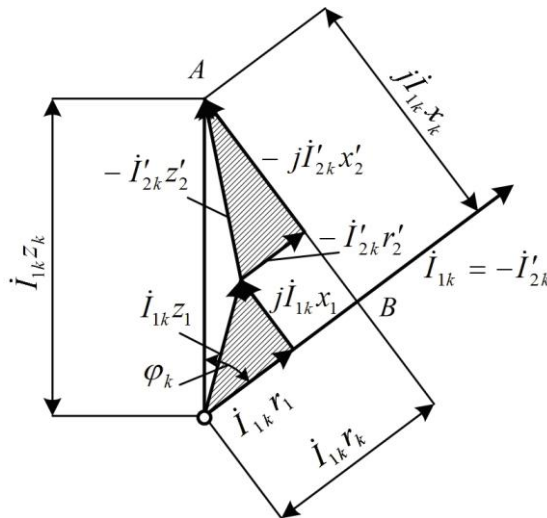
Як впливає з (3.49), магнітний потік у магнітопроводі трансформатора пропорційний первинній напрузі U_1 . Оскільки ця напруга при досліді к.з. становить не більше 10% від $U_{1ном}$, то таке ж невелике значення має і магнітний потік. Для створення такого магнітного потоку потрібний настільки малий струм намагнічування, що значенням його можна знехтувати. У цьому випадку рівняння струмів приймає вид

$$\dot{I}_{1к} = -\dot{I}'_{2к}, \quad (3.50)$$

а схема заміщення трансформаторів для досліді к.з. не містить гілки намагнічування (рис. 3.19, а). Для цієї схеми заміщення можна записати рівняння напруг



а)



б)

Рис. 3.19 – Схема заміщення (а) і векторна діаграма (б) трансформатора в режимі к.з.

$$\dot{U}_\kappa = \dot{I}_{1k}(r_1 + r'_2) + j\dot{I}_{1k}(x_1 + x'_2), \quad (3.51)$$

або

$$\dot{U}_\kappa = \dot{I}_{1k}r_k + j\dot{I}_{1k}x_k = \dot{I}_{1k}Z_k. \quad (3.52)$$

Повний опір трансформатора при досліді к.з.

$$Z_\kappa = r_\kappa + jx_\kappa \quad (3.53)$$

де r_κ і x_κ – активна і індуктивна складова опору к.з. Z_κ .

Скориставшись рівняннями струмів (3.50) і напруг (3.51), для досліду к.з. побудуємо векторну діаграму трансформатора (рис. 3.19, б). Побудову цієї діаграми починають із вектора напруги к.з. $U_\kappa = I_{1k}Z_\kappa$. Потім під кутом φ до вектора U_κ проводять вектор струму к.з. $I_{1k} = -I_{2k}$. Побудувавши вектори падіння напруг в первинній обмотці $\dot{I}_{1k}r_1$ і $j\dot{I}_{1k}x_1$, та вектори падіння напруги у вторинній обмотці $-\dot{I}'_{2k}r'_2$ і $-j\dot{I}'_{2k}x'_2$, одержують прямокутний трикутник АОВ, що отримав назву трикутника короткого замикання. Сторони цього трикутника будуть:

$$\begin{aligned} \overline{OB} &= \dot{I}_{1k}r_1 + \dot{I}'_{2k}r'_2 = \dot{I}_{1k}r_k = \dot{U}_{\kappa,a}; \\ \overline{BA} &= \dot{I}_{1k}jx_1 + j\dot{I}'_{2k}x'_2 = \dot{I}_{1k}x_k = \dot{U}_{\kappa,p}; \\ \overline{OA} &= \dot{I}_{1k}Z_k = \dot{U}_\kappa. \end{aligned}$$

Тут

$$U_\kappa = \sqrt{U_{\kappa,a}^2 + U_{\kappa,p}^2}, \quad (3.54)$$

де $U_{\kappa,a}$, $U_{\kappa,p}$ – активна і реактивна складові напруги к.з., В.

Повний, активний і індуктивний опори схеми заміщення при досліді к.з.:

$$z_\kappa = U_\kappa / I_{1k}; \quad (3.55)$$

$$r_\kappa = z_\kappa \cos \varphi_\kappa; \quad (3.56)$$

$$x_\kappa = \sqrt{z_\kappa^2 - r_\kappa^2}. \quad (3.57)$$

Отримані значення опорів r_κ і z_κ , потужності P_κ , коефіцієнта потужності $\cos \phi$ і напруги к.з. u_κ варто привести до робочої температури обмоток +75 °С:

$$r_{k75} = r_k \left[1 + \alpha (75^\circ - \Theta_1) \right]; \quad (3.55)$$

$$z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2}; \quad (3.59)$$

$$\cos \phi_{k75} = r_{k75} / z_{k75}; \quad (3.60)$$

$$u_{k75} = (I_{k75} z_{k75} / U_{1ном}) 100; \quad (3.61)$$

Тут r_k – активний опір к.з. при температурі θ_1 ; $\alpha = 0,004$ – температурний коефіцієнт для міді і алюмінію.

Оскільки при досліді к.з. основний потік Φ_{max} становить усього лише кілька відсотків у порівнянні з його значенням при номінальній первинній напрузі, то магнітними втратами, що викликані цим потоком, можна знехтувати. Отже, можна вважати, що потужність P_k , споживана трансформатором під час проведення досліді к.з., іде повністю на покриття електричних втрат в обмотках трансформатора:

$$P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_{1k}^2 r'_2 = I_{1k}^2 r_k.$$

Потужність к.з. приводять до робочої температури обмоток $+75^\circ\text{C}$:

$$P_{k75} = 3I_{1k}^2 r_{k75}. \quad (3.62)$$

Спрощена векторна діаграма трансформатора

Векторна діаграма навантаженого трансформатора (рис.3.7) наочно показує співвідношення між параметрами трансформатора. Через складність ця діаграма не може бути використана для практичних розрахунків. Для спрощення діаграми і надання їй практичного значення в силових трансформаторах, що працюють із навантаженням, близьким до номінального, нехтують 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 і I_2 невеликий. При зробленому допущенні схема заміщення трансформатора набуває спрощеного виду, так як не має гілки намагнічування і складається тільки з послідовних ділянок $r_k = r_1 + r'_2$ і $x_k = x_1 + x'_2$ (рис. 3.20, а).

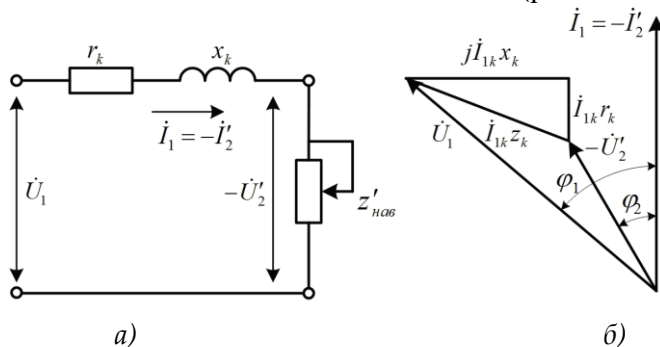


Рис. 3.20 – Спрощена схема заміщення (а) і векторна діаграма (б) трансформатора

Відповідно до спрощеної схеми заміщення побудована і спрощена векторна діаграма (рис. 3.20, б), у якій прямокутний трикутник ABC – це трикутник к.з., сторони якого відповідно рівні:

$$BC = I_1 r_k; CA = I_1 Z_k; AB = I_1 x_k$$

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

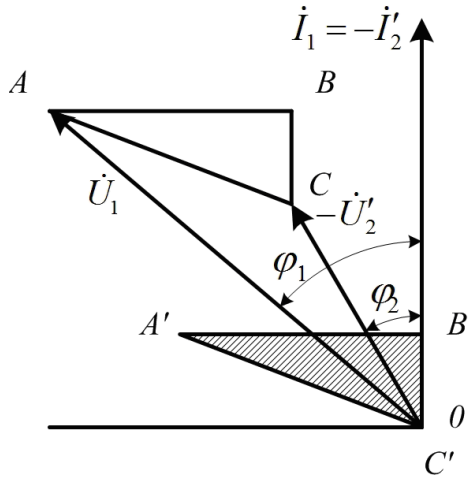


Рис. 3.21 – Побудова спрощеної векторної діаграми

Порядок побудови спрощеної векторної діаграми наступний (рис. 3.21). 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 точка C' співпала із точкою початку координат, а катет C'B' – з віссю ординат. Потім цей трикутник переносять, сполучаючи точку C з кінцем вектора $-\dot{U}_2'$, залишаючи сторони паралельними вихідному трикутнику A'B'C'. Одержують трикутник ABC. Після цих побудов з початку осі координат (точка 0) проводять вектор первинної (фазної) напруги $\dot{U}_1$ і визначають кут фазового зсуву φ_1 між первинним струмом $\dot{I}_1$, і первинною напругою $\dot{U}_1$.

Зовнішня характеристика трансформатора

При коливаннях навантаження трансформатора його вторинна напруга U'_2 міняється. У цьому можна перекоонатися, скориставшись спрощеною схемою заміщення трансформатора (рис. 3.20), з якої видно, що $\dot{U}'_2 = \dot{U}_{1ном} - \dot{I}_1 Z_k$.

Зміна вторинної напруги трансформатора при збільшенні навантаження від х.х. до номінальної є найважливішою характеристикою трансформатора і визначається виразом

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{1ном} - U'_2}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (3.63)$$

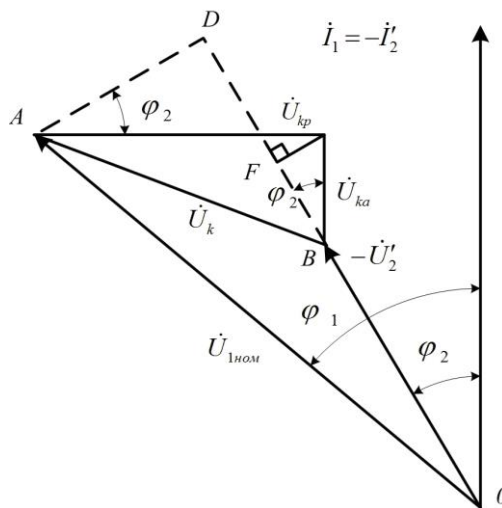


Рис. 3.22 – До виведення формули $\Delta U_{ном}$

Для визначення $\Delta U_{ном}$ скористаємося спрощеною векторною діаграмою трансформатора, зробивши на ній наступні додаткові побудови (рис. 3.22.). Із точки А опустимо перпендикуляр на продовження вектора $-\dot{U}'_2$, одержимо точку D. З деяким допущенням будемо вважати, що відрізок $\overline{BD}$ є різницею

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1ном} - \dot{U}'_2 &= \overline{BD} = \overline{BF} + \overline{FD}, \\ \text{де } \overline{BF} &= U_{k.a.} \cos \varphi_2; \overline{FD} = U_{k.p.} \sin \varphi_2, \text{ тоді} \\ U_{1ном} - U'_2 &= U_{k.a.} \cos \varphi_2 + U_{k.p.} \sin \varphi_2. \end{aligned} \quad (3.64)$$

Вимір вторинної напруги прийме вид

$$\Delta U_{\text{ном}} = (U_{k.a.} \cos \varphi_2 + U_{k.p.} \sin \varphi_2) 100 / U_{1\text{ном}}. \quad (3.65)$$

Позначимо $(U_{ka}/U_{1\text{ном}})100=U_{ka.}$; $(U_{kp}/U_{1\text{ном}})100=U_{kp.}$ тоді вираз зміни вторинної напруги трансформатора при збільшенні навантаження прийме вид

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{k.a.} \cos \varphi_2 + u_{k.p.} \sin \varphi_2. \quad (3.66)$$

Вираз (3.66) дає можливість визначити зміну вторинної напруги лише при номінальному навантаженні трансформатора. При необхідності розрахунку значення вторинної напруги для будь-якого навантаження у вираз (3.66) варто ввести коефіцієнт навантаження, що є відносним значенням струму навантаження $\beta=I_2/I_{2\text{ном}}$

$$\Delta U = \beta(u_{k.a.} \cos \varphi_2 + u_{k.p.} \sin \varphi_2). \quad (3.67)$$

З виразу (3.67) видно, що зміна вторинної напруги ΔU залежить не тільки від величини навантаження трансформатора (β), але і від характеру цього навантаження (φ_2).

На рисунку 3.23, а представлений графік залежності $\Delta U = f(\varphi_2)$ при $\cos \varphi_2 = \text{const}$, а на рисунку 3.23, б – графік $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$ при $\beta = \text{const}$. На цих графіках від'ємні значення ΔU при роботі трансформатора з ємнісним навантаженням відповідають підвищенню напруги при переході від режиму х.х. до навантаження.

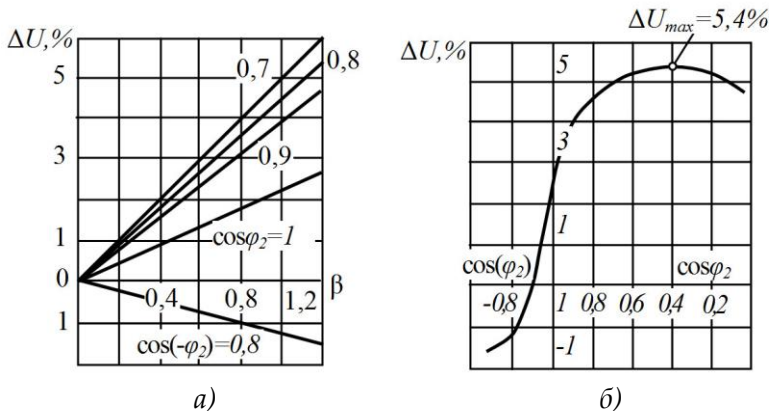


Рис. 3.23 – Залежність ΔU від величини навантаження (а) і коефіцієнта потужності навантаження (б) трифазного трансформатора (100 кВ·А, 6,3/0,22 кВт, $u_k=5,4\%$, $\cos \varphi_k=0,4$)

Маючи на увазі, що $u_{k.a.} = u_k \cos \varphi_k$, $u_{k.p.} \sin \varphi_k$, одержимо ще один вираз для розрахунку зміни вторинної напруги при будь-якому навантаженні:

$$\Delta U = \beta u_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) = \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (3.68)$$

З (3.68) видно, що найбільше значення зміни напруги $\Delta U = u_k$ має місце при рівності кутів фазового зсуву $\varphi_2 = \varphi_k$, 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 приймається напруга на затисках вторинної обмотки в режимі х.х. при номінальній первинній напрузі.

Вид зовнішньої характеристики (рис. 3.24) залежить від характеру навантаження трансформатора ($\cos \varphi_2$). Зовнішню характеристику трансформатора можна побудувати за (3.68) шляхом розрахунку ΔU для різних значень β і $\cos \varphi_2$.

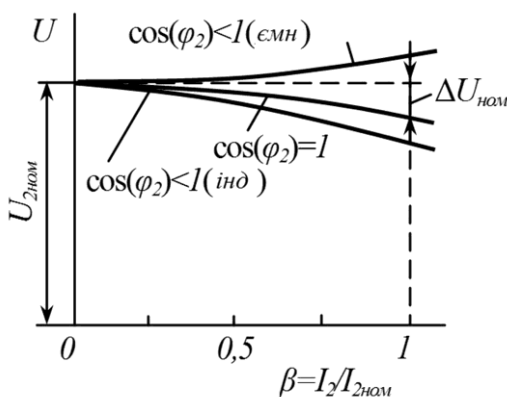


Рис. 3.24 – Зовнішні характеристики трансформатора

Втрати і ККД трансформатора

У процесі трансформування електричної енергії частина енергії витрачається в трансформаторі на покриття втрат. Втрати в трансформаторі поділяються на електричні і магнітні.

Електричні втрати обумовлені нагріванням обмоток трансформаторів при проходженні по цих обмотках електричного струму. Потужність електричних втрат P_e пропорційна квадрату струму і

визначається сумою електричних втрат у первинній P_{e1} і вторинній P_{e2} обмотках:

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2, \quad (3.69)$$

де m – число фаз трансформатора (для однофазного трансформатора $m = 1$, для трифазного $m = 3$).

При проектуванні трансформатора величину електричних втрат визначають за (3.69), а для виготовленого трансформатора ці втрати визначають дослідним шляхом, вимірявши потужність к.з. при номінальних струмах в обмотках $P_{к.ном}$

$$P_e = \beta^2 P_{к.ном}, \quad (3.70)$$

де β – коефіцієнт навантаження.

Електричні втрати називають змінними, тому що їх величина залежить від навантаження трансформатора (рис. 3.25).

Магнітні втрати спостерігаються головним чином у магнітопроводі трансформатора. Причина цих втрат – систематичне перемагнічування магнітопроводу змінним магнітним полем. Це перемагнічування викликає в магнітопроводі два види магнітних втрат: втрати від гістерезису P_h , пов'язані з витратою енергії на знищення залишкового магнетизму у феромагнітному матеріалі магнітопроводу, і втрати від вихрових струмів $P_{вс}$, що наводяться змінним магнітним полем у пластинах магнітопроводу:

$$P_m = P_h + P_{вс}$$

З метою зменшення магнітних втрат магнітопровід трансформатора виконують із магнітно-м'якого феромагнітного матеріалу – тонколистової електротехнічної сталі. При цьому магнітопровід роблять шихтованим у вигляді пакетів з тонких пластин (смуг), ізольованих із двох сторін тонкою плівкою лаку.

Магнітні втрати від гістерезису прямо пропорційні частоті перемагнічування магнітопроводу, тобто частоті змінного струму ($P_h = f$), а магнітні втрати від вихрових струмів пропорційні квадрату цієї частоти ($P_{вс} = f^2$). Сумарні магнітні втрати прийнято вважати пропорційними частоті струму ступеня 1,3, тобто $P_m = f_{1,3}$. Величина магнітних втрат залежить також і від магнітної індукції в стрижнях і ядрах магнітопроводу ($P_m \propto B^2$). При незмінній первинній напрузі ($U_1 = \text{const}$) магнітні втрати постійні, тобто не залежать від навантаження трансформатора (рис. 3.25, а).

При проектуванні трансформатора магнітні втрати визначають за значенням питомих магнітних втрат $P_{\text{пит}}$, що спостерігаються в 1 кг тонколистової електротехнічної сталі при значеннях магнітної індукції 1,0; 1,5 або 1,7 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц

$$P_m = P_{\text{пит}} \left(\frac{B}{B_x} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G \quad (3.71)$$

де B – фактичне значення магнітної індукції в стрижні або ярмі магнітопроводу трансформатора, Тл;

B_x – магнітна індукція, що відповідає прийнятому значенню питомих магнітних втрат, наприклад $B_x = 1,0$ або 1,5 Тл;

G – маса стрижня або ярма магнітопроводу, кг.

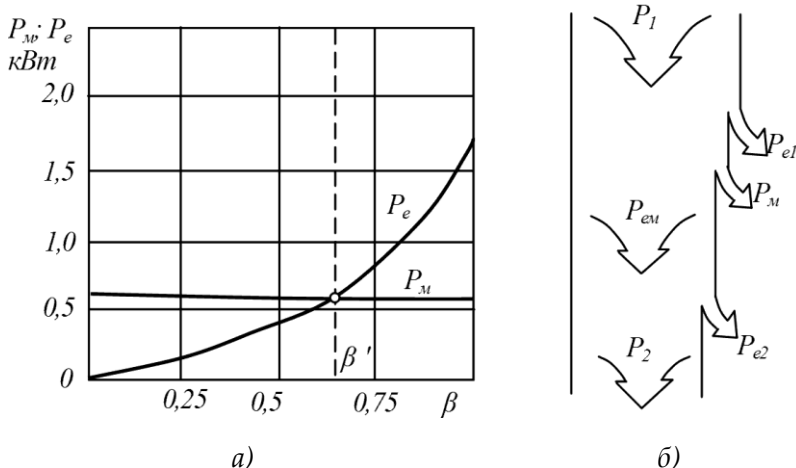


Рис. 3.25 – Залежність втрат трансформатора від його навантаження (а) і енергетична діаграма (б) трансформатора

Значення питомих магнітних втрат зазначені в стандарті на тонколистову електротехнічну сталь. Наприклад, для сталі марки 3411 товщиною 0,5 мм при $B = 1,5$ Тл і $f = 50$ Гц питомі магнітні втрати $P_{1,5/50} = 2,45$ Вт/кг.

Для виготовленого трансформатора магнітні втрати визначають дослідним шляхом, вимірявши потужність х.х. при номінальній первинній напрузі $P_{0\text{ном}}$.

Таким чином, активна потужність P_1 , що надходить із мережі в первинну обмотку трансформатора, частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{el} . Змінний магнітний потік викликає в магнітопроводі трансформатора магнітні втрати P_{em} . Потужність,

що залишилась, називається електромагнітною потужністю $P_{em} = P_1 - P_{e1} - P_m$, передається у вторинну обмотку, де частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e2} . Активна потужність, що надходить у навантаження трансформатора, $P_2 = P_1 - \Sigma P$, де $\Sigma P = P_{e1} + P_m + P_{e2}$ – сумарні втрати в трансформаторі. Всі види втрат, що супроводжують робочий процес трансформатора, показані на енергетичній діаграмі (рис. 3.25, б).

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається як відношення активної потужності на виході вторинної обмотки P_2 (корисна потужність) до активної потужності на вході первинної обмотки P_1 (потужність, що підводиться):

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Sigma P) / P_1 = 1 - \Sigma P / P_1 \quad (3.72)$$

Сумарні втрати $\Sigma P = P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}$.

Активна потужність на виході вторинної обмотки трифазного трансформатора (Вт)

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2, \quad (3.73)$$

де $S_{ном} = \sqrt{3} U_{2ном} I_{2ном}$ – номінальна потужність трансформатора, ВА;

I_2 і U_2 – лінійні значення струму, А, і напруги В.

З огляду на те, що $P_1 = P_2 + \Sigma P$, одержуємо вираз для розрахунку ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}} \quad (3.74)$$

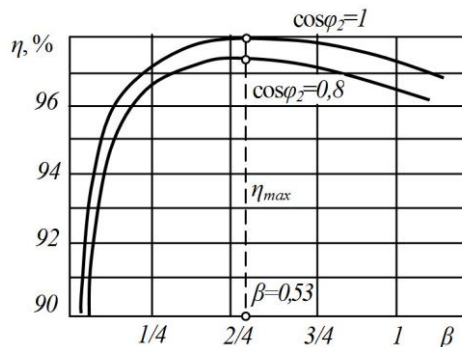


Рис. 3.26 – Графік залежності ККД трансформатора від навантаження

Аналіз виразу (3.74) показує, що ККД трансформатора залежить як від величини (β), так і від характеру ($\cos\varphi_2$) навантаження. Ця залежність ілюструється графіками (рис. 3.26). Максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому магнітні втрати рівні електричним: $P_{0ном} = \beta^2 / P_{к.ном}$, звідси значення коефіцієнта навантаження, що відповідає максимальному ККД,

$$\beta = \sqrt{P_{0ном} / P_{к.ном}} \quad (3.75)$$

Вираз максимального ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + 2P_{0ном}} \quad (3.76)$$

Крім розглянутого ККД по потужності іноді користуються поняттям ККД по енергії – відношенням кількості енергії, відданої трансформатором споживачеві W_2 (кВт год) протягом року, до енергії W_1 , отриманої їм від живильної електромережі за цей же час: $\eta = W_2 / W_1$.

ККД трансформатора по енергії характеризує ефективність експлуатації трансформації.

Регулювання напруги трансформаторів

Обмотки ВН понижувальних трансформаторів виконують із регульовальними відгалуженнями, за допомогою яких можна одержати коефіцієнт трансформації, що трохи відрізняється від номінального. Необхідність у цьому пояснюється тим, що напруги в різних точках лінії електропередачі, куди можуть бути включені понижувальні трансформатори, відрізняються одна від одної і, як правило, від номінальної первинної напруги. Крім того, напруга в будь-якому місці лінії може змінюватися через коливання навантаження. Але оскільки напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора у всіх випадках повинна дорівнювати номінальній або незначно відрізнятися від неї, то можливість зміни коефіцієнта трансформації стає необхідною. Регульовальні відгалуження роблять у кожній фазі або поблизу нульової точки, або посередині обмотки. У першому випадку на кожній фазі роблять по три відгалуження (рис. 3.27, а), при цьому середнє відгалуження відповідає номінальному коефіцієнту трансформації, а два інших – коефіцієнтам трансформації, що відрізняються від номінального на $\pm 5\%$. У другому випадку обмотку розділяють на дві

частини і роблять шість відгалужень (рис. 3.27, б). Це дає можливість крім номінального коефіцієнта трансформації одержати ще чотири додаткових значення, що відрізняються від номінального на $\pm 2,5$ і $\pm 5\%$.

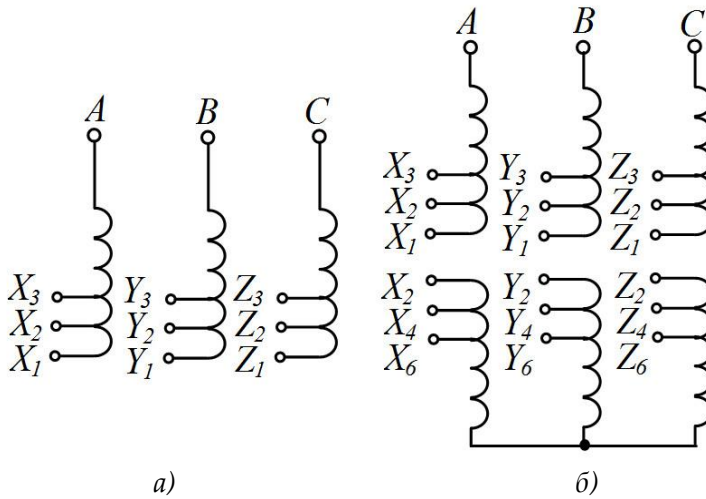


Рис. 3.27 – Схеми обмоток трифазних трансформаторів з регулювальними відгалуженнями

Перемикачі відгалуження обмоток можна при відключеному від мережі трансформаторі (перемикання без збудження – ПБВ) або ж без відключення трансформатора (регулювання під навантаженням – РПН). Для ПБВ застосовують перемикачі відгалужень (рис. 3.29).

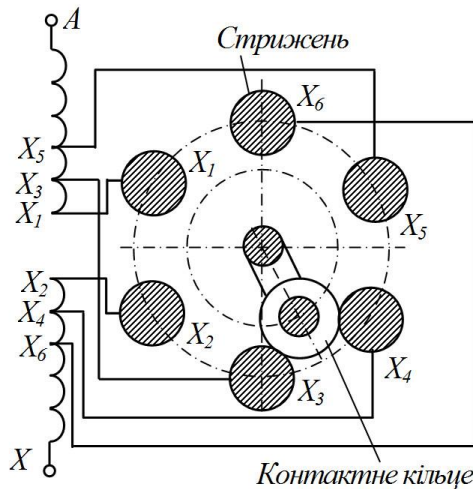


Рис. 3.28 – Перемикач відгалужень ПБВ

На кожну фазу встановлюють по одному перемикачу, при цьому вал, що обертає контактні кільця перемикачів по всіх фазах одночасно, зв'язаний за допомогою штанги з рукояткою на кришці бака трансформатора (рис. 3.28). Принцип РПН заснований на зміні коефіцієнта трансформації за допомогою регульовальних відгалужень. Однак перемикання з одного відгалуження на інше здійснюють без розриву кола робочого струму. Із цією метою обмотку кожної фази забезпечують спеціальним перемикаючим пристроєм, що складається з реактора P двох контакторів з контактами $K1$ і $K2$ і перемикача із двома рухливими контактами $\Pi1$ і $\Pi2$ (рис. 3.29, а).

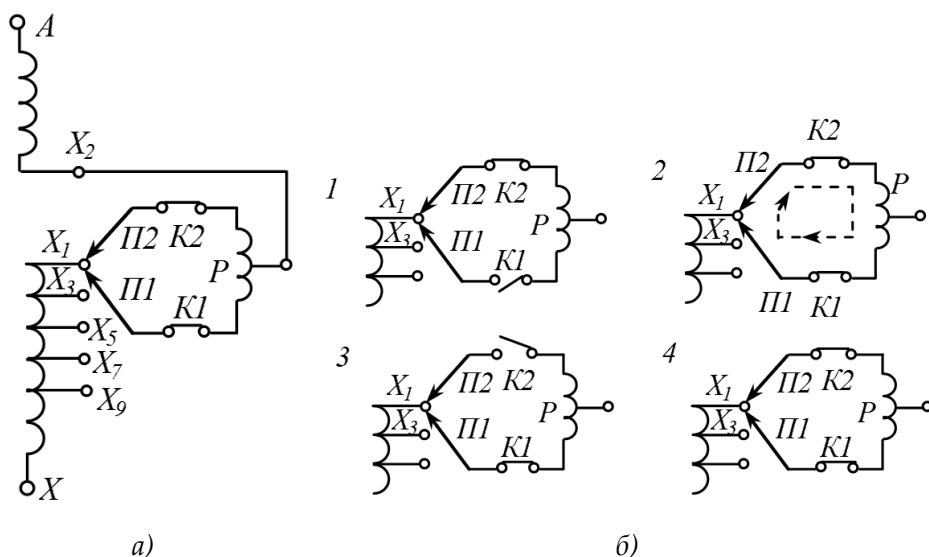


Рис. 3.29 – Послідовність перемикання контактів під навантаженням

У робочому положенні обидва рухливих контакти перемикача перебувають на одному відгалуженні, контакти $K1$ і $K2$ замкнуті і робочий струм спрямований паралельно по двох половинах обмотки реактора. Якщо виникла необхідність перемикання з одного відгалуження на інше, наприклад, з X_1 на X_3 , то розімкнуться контакти контактора $K1$ (положення 1 на рис. 3.29, б), рухливий контакт $\Pi1$ перемикача знеструмленої гілки переводиться на інше відгалуження і контакти контактора $K1$ знову замикаються (положення 2). У цьому положенні частина обмотки між відгалуженнями X_1 і X_3 виявляється замкнутою. Однак струм у колі перемикаючого пристрою не досягає

великого значення, тому що він обмежується опором реактора Р. У такому ж порядку здійснюється перемикання рухливого контакту К2 з відгалуження Х₁ на відгалуження Х₃ (положення 3 і 4), після чого процес перемикання закінчується. Апаратура РПН розташовується в одному баку із трансформатором, а її перемикання автоматизовано або здійснюється дистанційно (із щита керування). Трансформатори із РПН звичайно розраховані для регулювання напруги в межах 6–10%.

При досить значних потужностях трансформатора апаратура РПН стає занадто громіздкою. У цьому випадку застосовують регулювання напруги за допомогою вольтододавального трансформатора, що складається із трансформатора ПТ, включеного послідовно, і регулювального автотрансформатора РА з перемикаючим пристроєм ПУ (рис. 3.30).

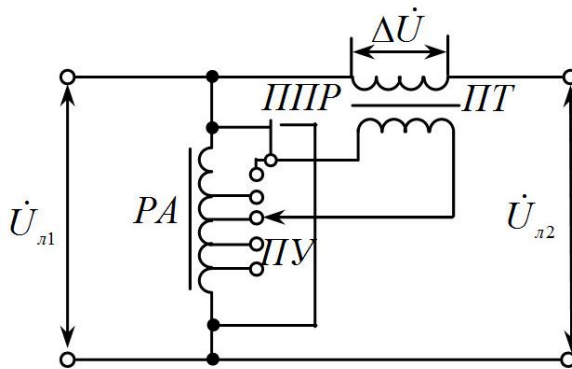


Рис. 3.30 – Схеми включення вольтододавального трансформатора

Напруга вторинної обмотки ΔU трансформатора ПТ сумується з напругою лінії $U_{л1}$ і змінює її до значення $U_{л2} = U_{л1} + \Delta U$. Величина ΔU може змінюватися за допомогою РА. При цьому перемикачем поздовжнього регулювання (ППР) можна змінювати фазу ΔU на $\pm 180^\circ$, так що одне положення ППР буде відповідати збільшенню напруги $U_{л2} = U_{л1} + \Delta U$, а інше – зменшенню напруги $U_{л2} = U_{л1} - \Delta U$. Крім того, можливі і інші способи фазового впливу на ΔU , наприклад комбінація різних схем з'єднання трифазних обмоток (зірка, трикутник) у вольтодобавочному трансформаторі, що створює фазові зсуви ΔU відносно $U_{л1}$ на кути 60° , 120° і 90° (поперечне регулювання). У цих випадках зміна ΔU впливає не тільки на значення, але і на фазу напруги $U_{л2}$.

3.3 ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ

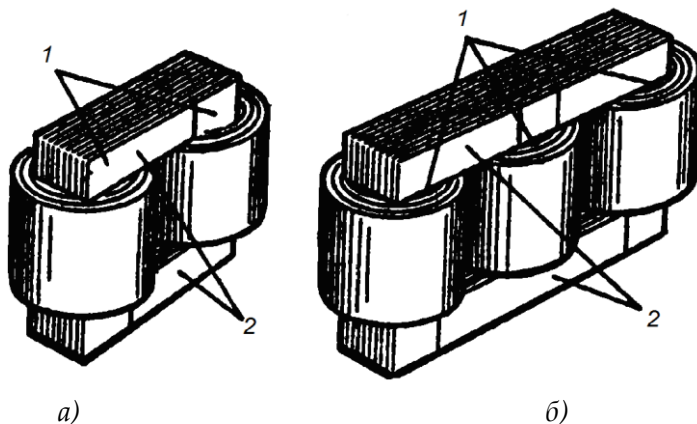
Будова трансформаторів

Найбільш розповсюдженим і важливим класом трансформаторів є силові трансформатори, призначені для перетворення енергії змінного струму в електричних мережах енергетичних систем (на електростанціях, підстанціях, промислових підприємствах, міських мережах, в сільському господарстві).

За конструкцією магнітопроводу трансформатори поділяються на стрижньові і броньові.

Магнітопровід трансформатора служить для посилення магнітного зв'язку між обмотками і є конструктивною основою для встановлення і кріплення обмоток, відводів і інших деталей трансформатора.

Стрижньовий тип магнітопроводу (рис. 3.31) характеризується тим, що ярма з'єднують кінці різних стрижнів та кожне ярмо розташовується тільки з боку торців стрижнів і обмоток трансформатора. При цьому по ярму проходить потік, що дорівнює потоку стрижня.



1 – стрижень; 2 – ярмо

Рис. 3.31 – Стрижньові магнітопроводи однофазного а) і трифазного б) трансформаторів

Броньовий тип магнітопроводу (рис. 3.32) характеризується тим, що обидва кінці кожного стрижня з'єднані не менш ніж з двома боковими ярмами, тобто ярма охоплюють не тільки торці обмоток,

але і їх бокові сторони. При цьому по ярму проходить потік, що дорівнює половині потоку стрижня, отже, перетин ярма менше перетину стрижня в два рази.

Магнітопроводи силових трансформаторів мають пласку стрижньову структуру. Незважаючи на наявність магнітної несиметрії фаз, цей тип магнітопроводу отримав найбільше розповсюдження внаслідок високої технологічності.

В силових трансформаторах потужністю 100000 кВА та більше застосовують стрижньовий магнітопровід з розгалуженими ярмами (рис. 3.33), що має назву бронестрижньового магнітопроводу.

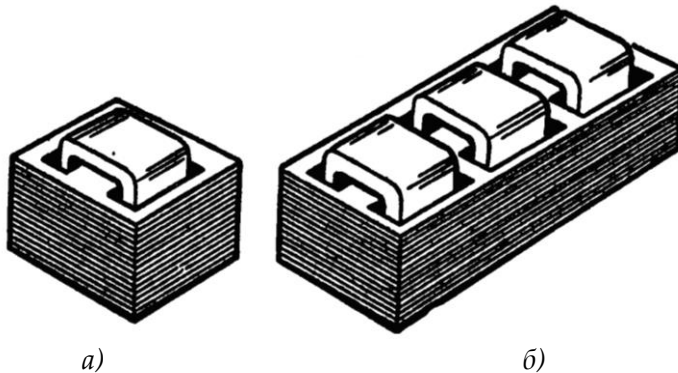
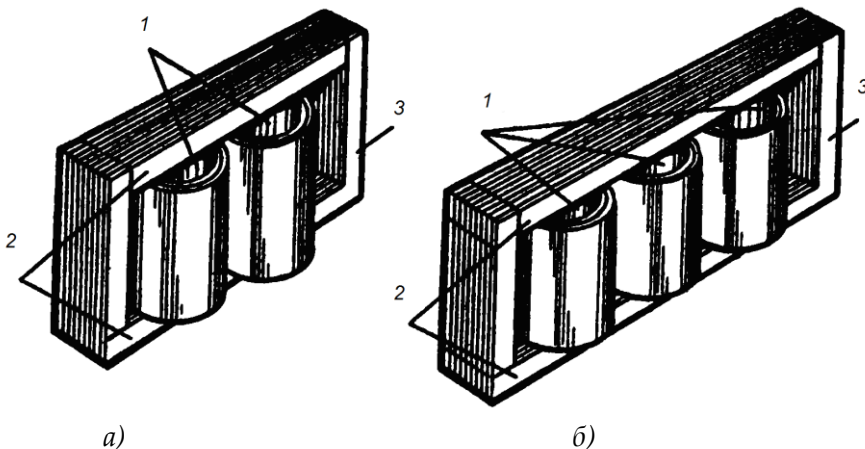


Рис. 3.32 – Броньовий магнітопровід однофазного а) і трифазного б) трансформаторів



1 – стрижень; 2 – торцеве ярмо; 3 – бокове ярмо

Рис. 3.33 – Бронестрижньовий магнітопровід однофазного а) і трифазного б) трансформатора

Для нього характерно те, що в однофазній конструкції кожен стрижень має одне бокове ярмо і потік ярма дорівнює половині потоку стрижня, у трифазній конструкції тільки два стрижня з трьох мають бокові ярма і потік ярма менше потоку стрижня в $\sqrt{3}$ рази. За рахунок застосування бокових ярем у бронестрижньовому магнітопроводі, в порівнянні з стрижневим, висота торцевих ярем в однофазній конструкції може бути зменшена у 2 рази, у трифазній – в $\sqrt{3}$ раз, внаслідок чого висота магнітопроводу та трансформатора в цілому істотно зменшується.

У трансформаторах потужністю до 6300 кВА достатньо широко використовується просторова структура (кольорова вкладка, рис. 3.34), в якій осі стрижнів і ярем розташовані в різних площинах. Просторова конструкція за рахунок більш рівномірного розподілення магнітного потоку дозволяє знизити масу магнітопроводу і зменшити втрати холостого ходу на 12–15%.

За способом з'єднання стрижнів з ярмами магнітопроводи поділяють на стикові, шихтовані і навиті. В стикових магнітопроводах стрижні і ярма збирають з пластин електротехнічної сталі окремо, а потім з'єднують по площині після насадки обмоток на стрижні. Вони відрізняються простотою збирання пластин, але наявність відносно великих немагнітних проміжків в місцях стиків викликає підвищене значення струму холостого ходу. В шихтованих магнітопроводах пластини стрижнів та ярем збирають в переплетіння – шихтують, що призводить до суттєвого зменшення немагнітних проміжків і струму холостого ходу. За формою стикування пластин стрижнів і ярем шихтовані магнітопроводи виконують з косими, прямими та комбінованими стиками. Використання в електромашинобудуванні рулонної холоднокатаної електротехнічної сталі дозволило впровадити навиті магнітопроводи, в яких окремі частини навиваються зі стрічок рулонної сталі, а потім скріплюються в єдину конструкцію.

В силових трансформаторах найбільшого поширення набула пласка стрижньова шихтована конструкція магнітопроводу. Перетин стрижнів такого магнітопроводу має вигляд симетричної ступінчастої фігури, яка вписана в коло. Це пов'язано з тим, що обмотки силових трансформаторів мають циліндричну форму і перетин стрижнів наближають до кола. Діаметр кола, в яке вписують ступінчасту фігуру (рис. 3.35) перетину стрижня, називають діаметром стрижня трансформатора.

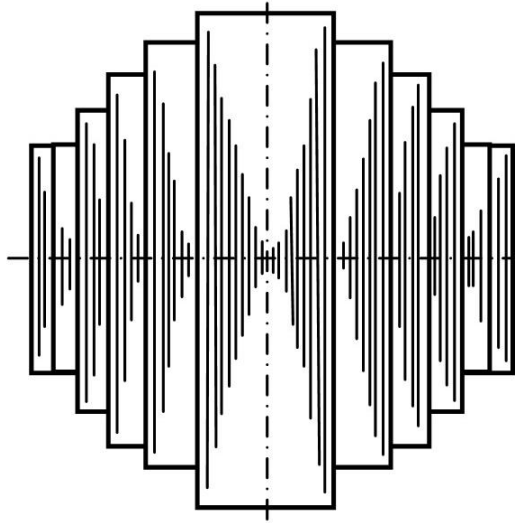


Рис. 3.35 – Ступінчастий переріз стрижнів і ярма

Для виготовлення магнітних систем (магнітопроводів) трансформаторів застосовують спеціальні тонколистові електротехнічні сталі, що мають підвищений (до 5 %) змісту кремнію.

Для виготовлення магнітопроводів силових трансформаторів застосовується холоднокатана анізотропна сталь товщиною 0,27 мм, 0,30 мм та 0,35 мм, питомі втрати якої в 2–2,5 рази нижчі ніж у гарячекатаної. Холоднокатана сталь дозволяє збільшити індукцію в магнітопроводі до 1,6–1,7 Тл при одночасному зменшенні маси сталі магнітопроводу, отже, і маси металу обмоток, що істотно знижує втрати в трансформаторі.

Обмотки є найважливішим елементом трансформатора. Вартість матеріалів та їх виготовлення складає приблизно 50% вартості трансформатора. Конструкції обмоток трансформаторів можуть суттєво розрізнятися залежно від потужності і напруги. Факторами, що визначають конструктивне виконання обмотки, є число витків, перетин витка і клас напруги. Класом напруги обмотки трансформатора називають тривало допустиму робочу напругу. Клас збігається з номінальною напругою електричної мережі, до якої підключається обмотка. Класом напруги трансформатора вважається клас напруги обмотки ВН.

Циліндричні одно- і двошарові обмотки (рис. 3.36, а) використовують в якості обмоток НН при номінальних струмах до 800 А,

багатошарові циліндричні обмотки (рис. 3.36, б) використовують в якості обмоток ВН (до 35 кВ), котушкові багатошарові циліндричні обмотки (рис. 3.36, в) розділяють за висотою на окремі багатошарові обмотки, виготовлені з круглого проводу.

В трансформаторах з охолодженням типу СД застосовують штучне форсування руху повітря за допомогою вентиляторів.

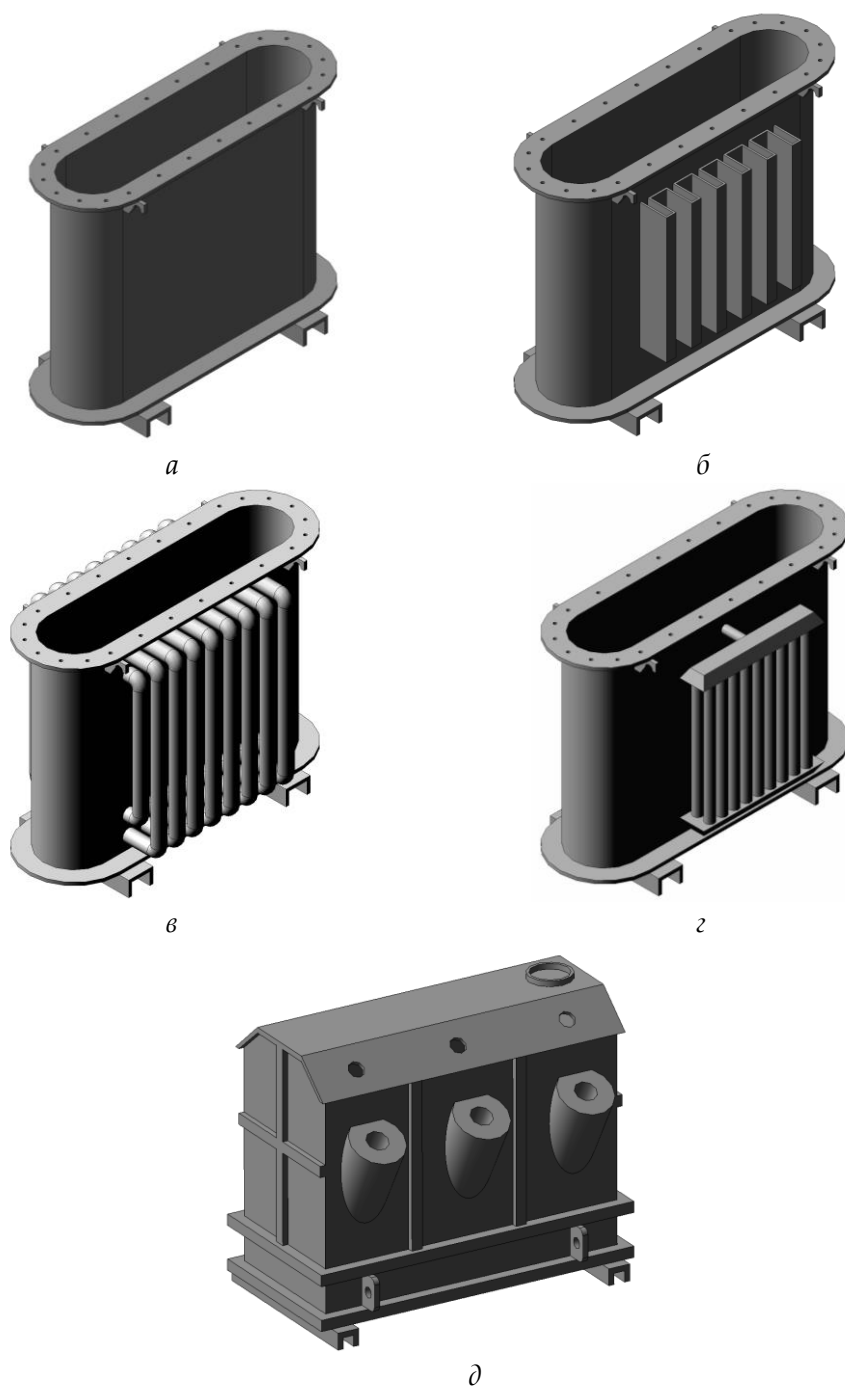
В трансформаторах з охолодженням типу М активну частину поміщають в бак, що заповнений трансформаторним маслом.

В трансформаторах з охолодженням типу Д встановлюють вентилятори, за допомогою яких здійснюється примусова циркуляція повітря вздовж зовнішніх поверхонь радіаторів та бака при природній циркуляції масла в них.



а – циліндричні обмотки; б – багатошарова циліндрична обмотка;
в – котушкова циліндрична обмотка; г – гвинтова обмотка;
д – безперервна обмотка

Рис. 3.36 – Конструкції обмоток трансформаторів



а – гладкий; *б* – ребристий; *в* – трубчатий; *г* – радіаторний;
д – колокольний

Рис. 3.37 – Баки силових трансформаторів

В трансформаторах з охолодженням типу МЦ та НМЦ на кожному радіаторі встановлюють насос для створення примусової циркуляції масла.

В трансформаторах з охолодженням типу ДЦ та НДЦ використовується примусова циркуляція масла через спеціальні малогабаритні охолоджувачі з примусовим повітряним охолодженням (рис. 3.38).

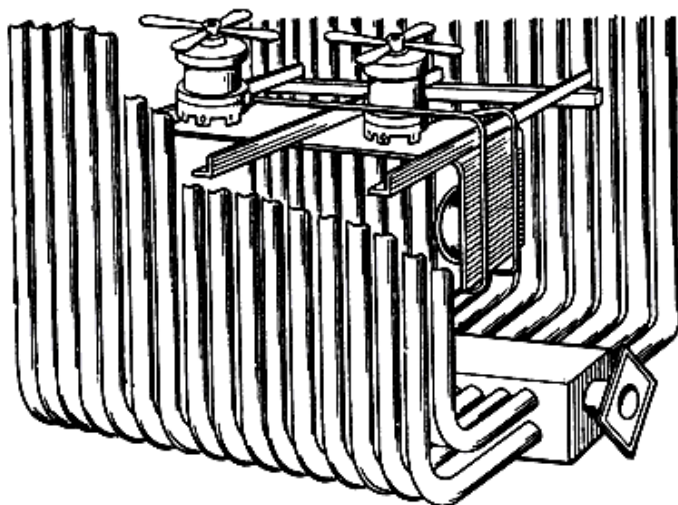


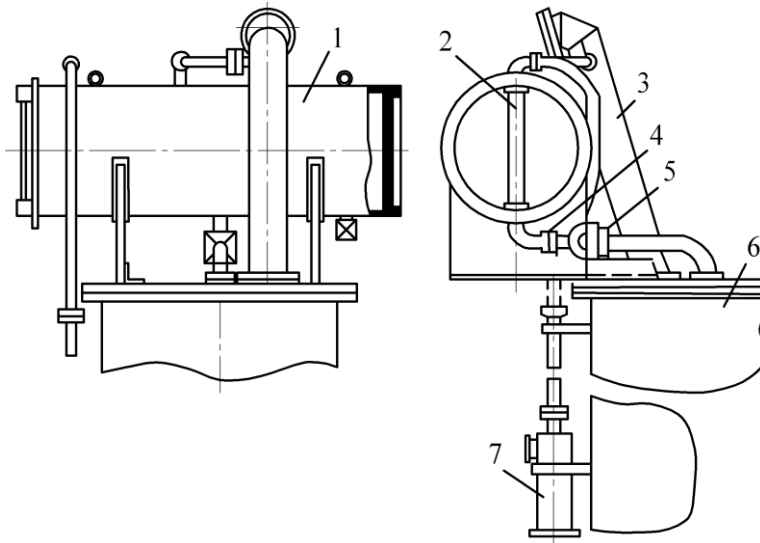
Рис. 3.38 – Трубчатий вентилятор з радіаторами

В трансформаторах з охолодженням типу Ц та НЦ використовується примусова циркуляція масла через охолоджувачі з примусовим водяним охолодженням.

В трансформаторах з охолодженням типу Н, НД та ННД активну частину поміщають в бак, заповнений синтетичною негорючою рідиною, що не окислюється – совтол, клофен, піранол.

Розширювач (рис. 3.39) призначений для компенсації коливань рівня масла в баку трансформатора при всіх можливих у експлуатації коливаннях температури та запобігає безпосередньому контакту масла з навколишнім повітрям.

Він встановлюється на всіх силових масляних трансформаторах класу напруги 5 кВ та потужністю 25 кВА та більше. Конструктивно розширювач – це циліндричний бачок, що встановлюється горизонтально над кришкою бака трансформатора та з'єднаний з ним трубопроводом (рис. 3.39).



1 – розширювач; 2 – масловказівник; 3 – вихлопна труба;
4 – плаский кран; 5 – газове реле; 6 – бак; 7 – очисник повітря

**Рис. 3.39 – Допоміжне обладнання системи охолодження
масляного трансформатора**

Об'єм розширювача складає приблизно 10 % від об'єму масла в баку. Застосування розширювача дозволяє захистити масло від передчасного окислення, оскільки, по-перше, поверхня дотику (дзеркала) масла з повітрям в розширювачі значно менше ніж в баку трансформатора, по-друге, температура масла в розширювачі нижче ніж температура масла у верхній частині трансформатора, і, по-третє, із-за відсутності циркуляції масла в розширювачі вода, що потрапляє в нього з повітря, та продукти окислення масла осаджуються у нижній частині розширювача та не потрапляють до баку трансформатора. Показчик рівня масла (масловказівник) призначений для контролю рівня масла в трансформаторі та встановлюється на торцевій частині з боку НН, а у трансформаторів без розширювача – на стінці баку у верхній його частині. На розширювачі або безпосередньо на масловказівнику наносяться три контрольні межі, що відповідають рівням масла при непрацюючому трансформаторі при температурах масла – 450°C , $+150^{\circ}\text{C}$, $+400^{\circ}\text{C}$.

Термометр призначений для контролю температури масла у верхніх шарах баку трансформатора та встановлюється на його кришці. В трансформаторах з потужністю до 630 кВА встановлюють

ртутні скляні термометри зі шкалою від 0 до 150° С. В трансформаторах з потужністю 1000 кВА та більше, а також в трансформаторах герметичного виконання потужністю 160 кВА та більше, для контролю температури масла на стінці бака встановлюють термометричні сигналізатори.

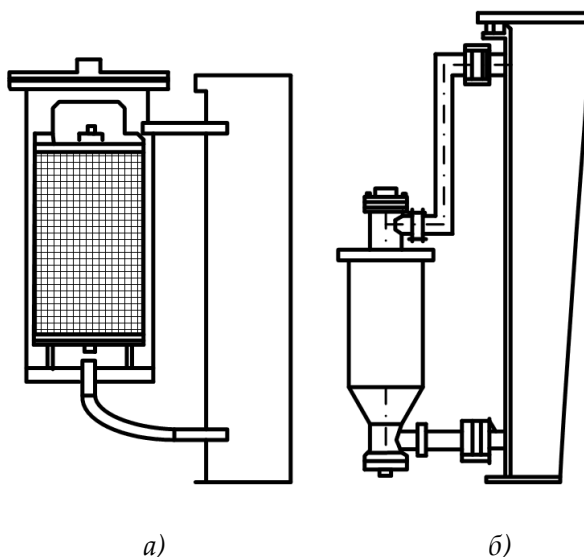


Рис. 3.40 – Конструкції термосифонних фільтрів масляних трансформаторів потужністю 160–30 кВА (а) та 1000 кВА (б)

Очисник повітря призначений для очистки від вологи та забруднення повітря, що потрапляє до трансформатора при температурних коливаннях рівня масла. В трансформаторах до 630 кВА включно, очисник повітря вбудовується безпосередньо у розширювач, а в трансформаторах потужністю 1000 кВА та більше встановлюється на розширювачі.

Термосифонний фільтр (рис. 3.40) призначений для безперервної автоматичної регенерації масла та встановлюється на силових трансформаторах потужністю 1000 кВА та більше. Термосифонний фільтр заповнюється силікагелем марки КСК.

Газове реле (рис. 3.39) призначене для захисту трансформатора від внутрішніх пошкоджень (виткового замикання в обмотках, пробоею ізоляції, “пожежі в сталі” магнітопроводу та ін.).

Вихлопна (запобіжна) труба (рис. 3.39) призначена для запобігання руйнування бака трансформатора при внутрішніх пошкодженнях, що супроводжуються виникненням електричної дуги, виділенням великої кількості газу та різким підвищенням тиску усередині бака. Вихлопна труба встановлюється на трансформаторах потужністю 1000 кВА та більше.

Арматура бака призначена для заливу, відбору проби, спуску та фільтрації масла. До неї відносяться крани, вентиля, засувки та пробки та ін.

Будова трифазного масляного трансформатора середньої потужності представлена на рисунку 3.41 (кольорова вкладка).

Серії трансформаторів

Силові трансформатори призначені для роботи в електричних мережах, що здійснюють безпосереднє постачання споживачів електричною енергією.

Потужності маслонаповнених трансформаторів розташовані у діапазоні до 2500 кВА; напруга сторони ВН – до 33 (35) кВ.

Силові трансформатори можуть установлюватися на розподільних підстанціях, у спеціальних приміщеннях, що безпосередньо примикають до виробничих цехів промислових підприємств, у відкритих установках. Ними здійснюється електропостачання:

- промислових підприємств і установок,
- житлових будинків і приміщень,
- сільськогосподарських підприємств тощо.

Напруга електричних мереж цехів підприємств і житлових приміщень (сторона НН) може бути 380В, 220В, 127В. У приміщеннях з підвищеною небезпекою, наприклад, у вибухонебезпечних, сирих та ін., повинна застосовуватися напруга 36В, 24В, 12В.

Позначення системи охолодження маслонаповнених і сухих РТ звичайно входить в умовну позначку їхнього типу.

Розподільні трансформатори призначені для роботи в електричних мережах, що безпосередньо постачають споживачів електричною енергією.

Потужності маслонаповнених розподільних трансформаторів (РТ) знаходяться у діапазоні до 2500 кВА; напруга сторони ВН — до 33 (35) кВ.

Загальні технічні вимоги до маслонаповнених трансформаторів [1] розповсюджуються і на розподільні трансформатори.

Системи охолодження сухих розподільних трансформаторів:

М – природне масляне охолодження;

МГ – природне масляне охолодження в герметичному виконанні (гофрований бак);

Н – природне охолодження негорючим рідким діелектриком;

С – природне повітряне охолодження при відкритому виконанні;

СЗ – природне повітряне при закритому виконанні;

СГ – природне повітряне при герметичному виконанні;

СД – повітряне із примусовою циркуляцією повітря;

СГЛ – природне повітряне з обмотками, залитими в епоксидні смоли, відкритого виконання;

СГЛЗ – те ж, захищеного виконання.

За видами захисту масла від впливів навколишнього середовища масляні трансформатори можуть виконуватися:

- “з диханням” через пристрої, заповнені силікагелем (ТМ);

- герметичні з гофрованим баком (ТМГ).

Трансформатори серій ТМ і ТМГ призначені для роботи на відкритих площадках, під навісом, у закритих провітрюваних приміщеннях і в умовах підвищеної вологості.

Маслонаповнені трансформатори негерметичні (серії ТМ).

Звичайне виконання – трифазний трансформатор з магнітною системою стрижневого типу. Активна частина, що складається з магнітопроводу з обмотками, жорстко з'єднана із кришкою бака. Ізоляція обмоток – папір, електрокартон, масло.

На активній частині кріпиться перемикач відгалужень обмотки ВН із діапазоном регулювання $\pm 2 \times 2,5\%$. Привід перемикача виведений на кришку бака. На кришці розташовуються вводи і розширювальний бак.

Маслонаповнені герметичні трансформатори (серії ТМГ).

Герметичні трансформатори серії ТМГ мають гофровані баки, що повністю обмежують контакт трансформаторного масла з навколишнім середовищем. Трансформатори повністю заливаються маслом; розширювальний бак у герметичних трансформаторів відсутній, оскільки температурні зміни обсягу масла компенсуються пружною деформацією гофрованих стінок бака. Перед заливанням трансформаторне масло дегазується. Протягом усього терміну служби

трансформатора масло практично не міняє своїх властивостей; робити відбір проби масла для наступного аналізу не потрібно. Для підтвердження ресурсу роботи протягом 25 років гофровані баки трансформаторів ТМГ піддаються механічним випробуванням на зносо-стійкість (10 000 циклів впливу максимального й мінімального тисків).

Заливання масла в бак трансформатора під глибоким вакуумом забезпечує підвищену електричну міцність ізоляції обмоток. Повнота заповнення маслом бака контролюється поплавковим показчиком на кришці бака. Регулювання напруги сторони ВН трансформатора рівнями $\pm 2,5\%$ здійснюється перемикаючим пристроєм, розташованим усередині бака.

Через відсутність безпосереднього контакту масла з киснем повітря, старіння ізоляції в герметичних трансформаторах істотно вповільнено.

На рисунку 3.42 (кольорова вкладка) представлений загальний вид розподільних масляних трансформаторів типу ТМ, а на рисунку 3.43 (кольорова вкладка) – герметичних типу ТМГ.

Магнітопровід маслонаповнених трансформаторів має стрижневу конструкцію. Для зниження втрат холостого ходу використовується косий стик пластин у місці з'єднання стрижнів і ярем. Застосування ступінчастого розташування стиків пластин (так зване з'єднання "степ-леп") у стрижнях і ярмах може додатково знизити втрати холостого ходу.

Обмотки ВН і НН на стрижні магнітопроводу можуть бути розташовані концентрично або чергуються в осьовому напрямку. Обмотки виконуються з мідного або алюмінієвого ізольованого провода. Виводи виконують проводом або мідними шинами.

Основними ізоляційними матеріалами є кабельний папір, електрокартон, паперово-бакелітові циліндри й трубки, гетинакс.

Перемикаючий пристрій установлюють всередині трансформатора з виводом приводу на кришку або бічну стінку бака. Якості складення перемикаючого пристрою, підключення до нього регулювальних відгалужень, стану контактів надається особлива увага, оскільки від цього залежить надійність роботи трансформатора; ослаблення контакту веде до його перегріву і часто до виходу трансформатора з ладу.

Для поліпшення охолодження трансформаторів типу ТМ на стінках баків установлюються радіатори; на кришці бака розміщений

розширювальний бак з масловказівником, гільза термометра для виміру температури верхніх шарів масла, знімні вводи обмоток ВН і НН, рукоятка перемикача, повітроосушувач. У нижній частині бака з боку НН розміщені: пробка для взяття проби масла, пробка або кран для зливу масла, болт для заземлення. У дні бака в трансформаторах, починаючи з потужності 100 кВА, є пробка для видалення залишків масла.

До дна бака приварені пластини (швелери), у яких передбачені отвори або вирізи для кріплення трансформаторів до фундаменту. У трансформаторах потужністю 100 кВА и вище на швелерах передбачена установка гладких котків для поздовжнього і поперечного переміщення на місці монтажу.

У трансформаторах серії ТМГ використовуються герметичні зварені баки з гофролистів прямокутної форми, конструкція яких забезпечує компенсацію температурних змін об'єму масла і його охолодження.

У багатьох випадках споживач висуває жорсткі вимоги до пожежонебезпеки трансформаторів.

В 50–60-і роки широке застосування мали трансформатори, заповнені малогорючою рідиною совтолом (закордонний аналог – аскарел.) Ці рідини у своїй основі мали трихлордифеніли – з'єднання токсичні і практично не розкладаються в природі. Утилізація совтола пов'язана з технологічними труднощами і обходиться відносно дорого. В 70-х роках застосування цих рідин було припинено.

У наш час замість совтола і аскарела застосовуються рідини на основі кремнійорганічних або поліефірних з'єднань.

Сухі трансформатори виготовляються у відкритому виконанні захищені металевим кожухом або відкритого виконання з обмотками, залитими епоксидними компаундами. Існують різноманітні конструкції сухих трансформаторів з різними типами ізоляції.

Перевагою сухих трансформаторів, у порівнянні з масляними, є простота їхньої конструкції і істотно менша пожежонебезпека. Недоліком сухих трансформаторів з деякими видами ізоляції є можливість їхнього зволоження. Тому сухі трансформатори встановлюються, як правило, у приміщеннях. Недоліком сухих трансформаторів є також можливість забруднення в процесі експлуатації як обмоток, так і трансформатора в цілому, а особливо в запиленіх приміщеннях. У

зв'язку з малою тепловою постійною часу перевантажувальна здатність сухих трансформаторів істотно менше, ніж масляних.

Найпоширенішими є сухі трансформатори із застосуванням різних ізоляційних матеріалів класу нагрівостійкості не нижче "F" (155 °C). В трансформаторах з таким типом ізоляції можуть використовуватися різні склотканини, плівкові і композиційні матеріали типів ЛСК-ТТ, РЭТСАР, ЛЭТСАР, склопластики типів СТЭФ, СТЭФ-НТ, СТ-ЭТФ (кольорова вкладка, рис. 3.44).

Для захисту від зволоження обмотки таких трансформаторів можуть просочуватися спеціальними лаками.

З метою безпеки активна частина трансформатора звичайно укладена в тонкостінний металевий кожух, що має отвори для входу і виходу охолодного повітря.

Через меншу інтенсивність охолодження повітрям, порівняно з маслом, сухі трансформатори мають трохи більші розміри, ніж масляні трансформатори тієї ж потужності і напруги.

В особливих випадках підвищеної вологості і обмеження розмірів може застосовуватися більш нагрівостійка й вологостійка ізоляція з додатковим покриттям (просоченням) обмоток спеціальними лаками, наприклад, кремнійорганічними, а також епоксидними смолами (кольорова вкладка, рис. 3.45, 3.46).

Обмотки ВН таких трансформаторів виконуються з алюмінієвої фольги і заливаються компаундом у вакуумі.

Завдяки такій конструкції трансформатори мають високу механічну міцність при струмах короткого замикання і, на відміну від звичайних сухих трансформаторів, їхні обмотки не піддані зволоженню і забрудненню. При виготовленні таких трансформаторів, а також при утилізації відходів виробництва, потрібні певні заходи щодо захисту персоналу від впливу компонентів смол.

Відомі випадки розтріскування литої ізоляції таких трансформаторів при високих температурах, пов'язаних з перевантаженнями, а також при температурі навколишнього середовища нижче -20 °C.

Цього недоліку не мають трансформатори, у яких ізоляція складається зі скловолокна або склострічки, просоченої тією же смолою.

Недоліком трансформаторів з литою ізоляцією є їх менша перевантажувальна здатність у порівнянні з масляними трансформаторами.

Головна і шарова ізоляція обмотки ВН трансформаторів “Резиблок” складається зі скляного волокна (ровинг), насиченого епоксидним компаундом без добавки наповнювача. Всі матеріали екологічні, не виділяють токсичних газів при високій температурі. Для більш інтенсивного охолодження обмоток при їхньому виготовленні в ізоляції виконуються осьові канали. Певна кількість шарів ровинга, що складається з декількох тисяч скляних волокон діаметром 3–6 мікронів, насиченого компаундом, навивається по радіальному й діагональному напрямках. Великий натяг при намотуванні ровинга дозволяє одержати обмотку з однорідною структурою без дрібних порожнеч або повітряних включень, що підвищує електричну міцність ізоляції.

Трансформатори з ізоляцією “Резиблок” мають високу електричну міцність, пожежобезпеку, екологічність, можуть експлуатуватися в особливо складних умовах: морських, тропічних, полярних, у хімічній, гірській або металургійній промисловості.

Арамідна ізоляція виконується на основі синтетичних матеріалів (ароматичних поліамід-арамідів). Арамідні матеріали мають високу електричну і механічну міцність, високу стійкість до хімічних продуктів, підвищену нагрівостійкість, не загоряються і не підтримують горіння, мають низьку гіроскопічність. Маючи робочу температуру 220–240°C, сухі трансформатори з арамідною ізоляцією переносять короткочасні перевантаження при температурі понад 300°C, екологічно чисті, майже не міняють характеристик при збільшенні вологості навколишнього середовища, що важливо для підтримки високої електричної міцності ізоляції.

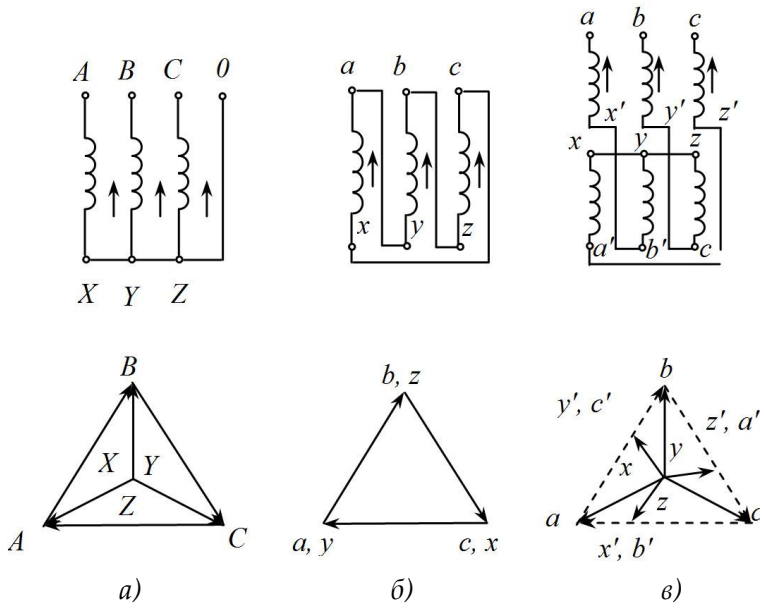
Арамідна ізоляція може застосовуватися для ізоляції обмоток як у сухих, так і в масляних трансформаторах. Підвищення в цьому випадку робочої температури обмотки дозволяє підвищити потужність сухих трансформаторів при тих же розмірах.

В маслонаповнених трансформаторах застосування проводів з емалевою ізоляцією для обмоток НН і арамідною для обмоток ВН також дозволяє підвищити робочу температуру обмоток і, отже, зменшити розміри трансформатора або трохи збільшити його потужність при незмінних розмірах. Обмеженням буде припустима температура верхнього масла. При цьому термін служби трансформатора буде істотно збільшений.

3.4 СХЕМИ І ГРУПИ З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Схеми з'єднання обмоток

Схемою з'єднання обмоток називають схему, за якою з'єднують обмотки всіх фаз однієї напруги. Обмотки трифазних трансформаторів прийнято з'єднувати за наступними схемами: зірка; зірка з нульовим виводом; трикутник; зигзаг з нульовим виводом (рис. 3.47).



а) зірка з нульовим проводом; б) трикутник; в) зигзаг

Рис. 3.47 – Схеми і векторні діаграми з'єднання обмоток трифазного трансформатора

Схеми з'єднання обмоток трансформатора позначають дробом, у чисельнику якого зазначена схема з'єднання обмоток ВН, а в знаменнику – обмоток НН. Наприклад, Y/Δ означає, що обмотки ВН з'єднані в зірку, а обмотки НН – у трикутник.

В схемах з'єднання за позитивний напрям ЕРС прийнято вважати напрям дії ЕРС від кінця обмотки до початку, що залежить від напрямку намотування обмотувального проводу. Якщо у однієї з обмоток змінити початок і кінець обмотки, то напрям ЕРС зміниться

на протилежний і це буде означати, що змінився напрям намотки обмотки. Звісно таке припущення умовне, однак при роботі трифазного трансформатора, коли кожна фазна обмотка зчіпляється з потоками від інших фаз, буде мати істотне значення.

Вибір схеми з'єднання залежить від багатьох причин. Основними при виборі схеми є: вартість активних матеріалів, вартість ізоляційних матеріалів, трудомісткість виготовлення, вид навантаження та режим роботи трансформатора. Наприклад, схему зірка з нулем вибирають при відносно високій напрузі, що призводить до зниження вартості ізоляції, оскільки фазне значення напруги буде менше лінійного; схему трикутник використовують при аналізі роботи трансформатора, спираючись на величину впливу вищих гармонійних складових напруги і струмів, а також на несиметрію навантаження; схему зигзаг, як правило, використовують в спеціальних трансформаторах або при нерівномірному та несиметричному навантаженні, хоча витрати обмотувального проводу при виконанні за цією схемою збільшуються на 15%.

Групи з'єднання

Під групою з'єднання розуміють кут зсуву по фазі між лінійними векторами ЕРС або напруги однойменних фаз обмотки ВН і НН трансформатора. За одиницю кута зсуву приймають кут в 30° .

В однофазному трансформаторі ЕРС первинної та вторинної обмоток можуть збігатися за фазою чи бути зсунуті на 180° . Група з'єднання залежить від напрямку намотування обмоток і позначення виводів (маркування). Якщо обмотки трансформатора намотані в один бік і мають симетричне маркування (рис. 3.48, а), то індуковані в них ЕРС будуть спрямовані однаково (група 0). У разі зміни маркування виводів чи напрямку намотування однієї з обмоток (рисунок 3.48, б) спостерігається зсув за фазою між векторами первинної та вторинної ЕРС на 180° (група б). Групи з'єднань позначають цілими числами від 0 до 11.

Із двох можливих груп з'єднань однофазних трансформаторів – I/I-0 і I/I-6 – промисловість випускає тільки I/I-0, в яких ЕРС первинної та вторинної обмоток збігаються за фазою.

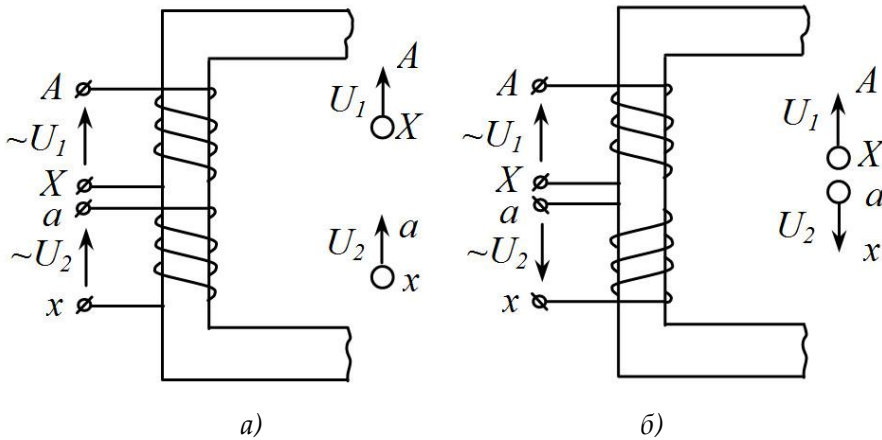
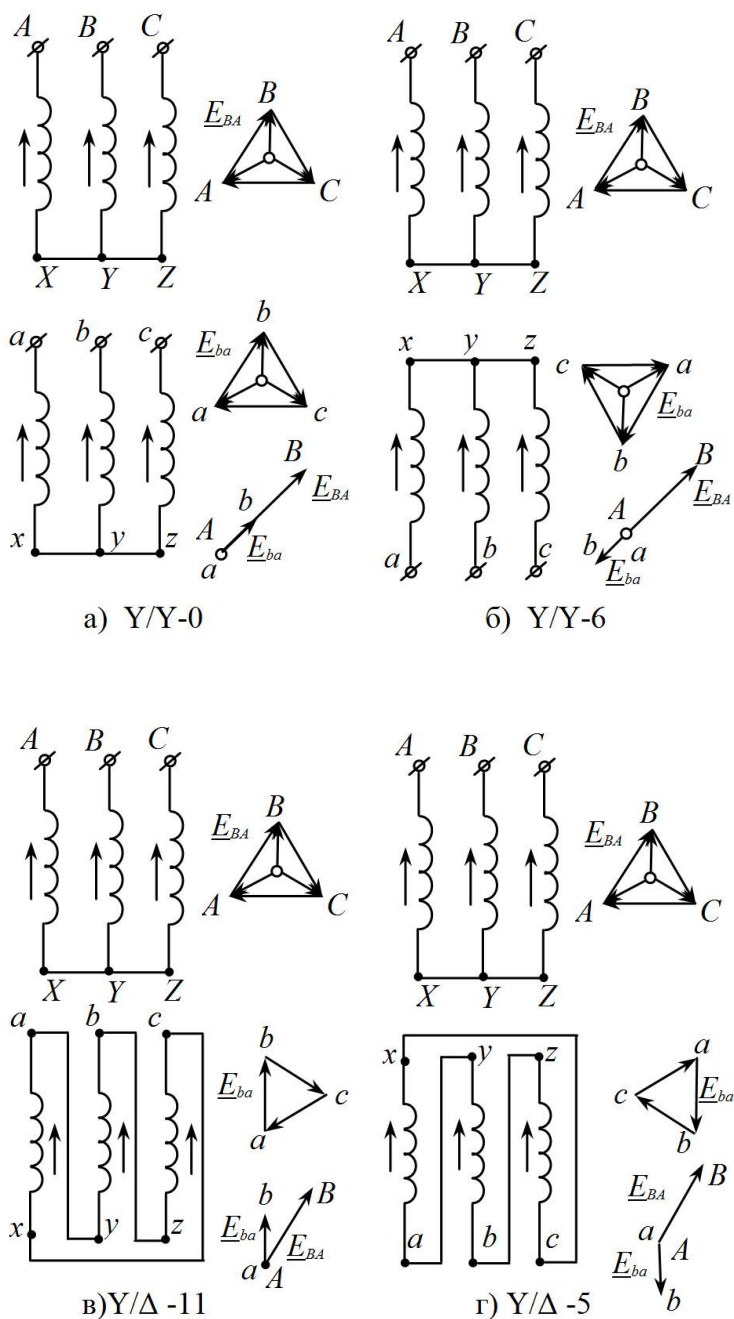


Рис. 3.48 – Схеми і векторні діаграми з'єднання обмоток трифазного трансформатора

У трифазних трансформаторах фазові ЕРС двох обмоток, розташованих на одному стрижні, можуть, як і в однофазних трансформаторах, або збігатися, або бути протилежного напрямку. Однак залежно від схеми з'єднання обмоток і порядку з'єднання їх початків і кінців можуть виходити різні кути зсуву фаз між лінійними ЕРС. На рисунку 3.49 показано схеми з'єднання обмоток Y/Y та відповідні векторні діаграми для нульової (рис. 3.49, а) і шостої (рис. 3.49, б) груп. На рисунку 3.49, в, г показано схеми з'єднання обмоток Y/Δ і відповідні векторні діаграми одинадцятої та п'ятої груп.

Змінивши маркування виводів обмоток, можна одержати й інші групи з'єднання: при схемах Y/Y , Δ/Δ – парні: другу, четверту і т. д.; при схемах Δ/Y , Y/Δ і Y/Z – непарні: першу, третю і т. д. Відповідно до Держстандарту промисловості випускає трифазні силові трансформатори тільки двох груп – нульової та одинадцятої. Це полегшує практичне вмикання трансформаторів на паралельну роботу.



a – нульова; b – шоста; $в$ – одинадцята; $г$ – п'ята

Рис. 3.49 – Групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора

3.5 ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА ТРАНСФОРМАТОРІВ

Умови вмикання трансформаторів на паралельну роботу

Паралельна робота трансформаторів необхідна:

а) для забезпечення резервування в енергопостачанні споживачів у випадках аварії, проведення ремонтів, планового профілактичного обслуговування трансформаторів і з'єднаного з ними устаткування;

б) для зменшення втрат енергії в періоди малих навантажень підстанції шляхом відключення такої частини паралельно працюючих трансформаторів, щоб ККД інших був максимальним.

Для досягнення оптимальних умов паралельної роботи трансформаторів необхідно, щоб загальне навантаження підстанції розподілялось між паралельно працюючими трансформаторами пропорційно до їх номінальних потужностей. Такий розподіл навантаження досягається, якщо у трансформаторів однакові:

а) групи з'єднань обмоток;

б) первинні і вторинні номінальні напруги чи, що практично те саме, коефіцієнти трансформації;

в) напруги короткого замикання.

Якщо перші дві умови дотримані, то вторинні напруги відповідних фаз трансформаторів на холостому ході будуть однакові за амплітудою і фазою. У протилежному випадку вже на холостому ході виникають зрівнювальні струми, що будуть циркулювати по замкнених контурах, утворених вторинними обмотками, і трансформуватися в первинні обмотки, викликаючи нерівномірне навантаження, а також зайві втрати і нагрівання трансформаторів.

Дотримання третьої умови забезпечує розподіл навантаження між трансформаторами відповідно до їх номінальних потужностей, що підвищує ККД підстанції та її навантажувальну здатність.

Паралельна робота трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток

Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток при дотриманні інших умов. При паралельній роботі трансформаторів з "0" і "11" групами з'єднання, ЕРС вторинних обмоток відповідних фаз трансформаторів будуть мати однакову амплітуду, але зсунуті за фазою на 30° (рис. 3.50).

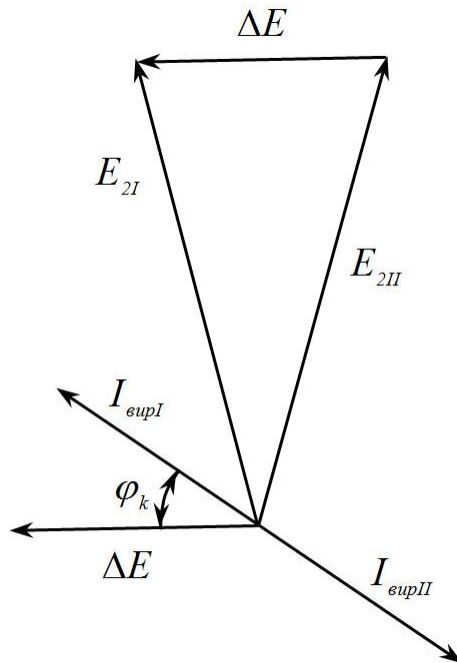


Рис. 3.50 – Спрощена векторна діаграма ЕРС вторинних обмоток трансформаторів

В замкненому контурі вторинних обмоток виникне різниця ЕРС

$$\Delta E = 2E_2 \sin 15^\circ = 0,518E_2. \quad (3.77)$$

Відповідно до величини різниці ЕРС ΔE в обмотках протікатиме зрівнювальний струм

$$I_{зр} = \frac{\Delta E}{Z_{kl} + Z_{kII}}, \quad (3.78)$$

де Z_{kl} і Z_{kII} – опори короткого замикання відповідно першого і другого трансформатора.

Якщо величини ΔE , Z_{kl} , Z_{kII} представити у відносних одиницях, то відносне значення зрівнювального струму при умові $Z_k^* = u_k^*$ буде дорівнювати

$$\frac{I_{вир}}{I_n} = \frac{\Delta E^*}{Z_{kl}^* + Z_{kII}^*} = \frac{\Delta E^*}{u_{kl}^* + u_{kII}^*} = \frac{0,518}{0,05 + 0,05} = 5,18. \quad (3.79)$$

Тобто зрівнювальний струм буде в 5,18 раза більше номінального. Таким чином, паралельна робота трансформаторів з різними

групами з'єднання неприпустима. Такий висновок стосується паралельної роботи трансформаторів з парними і непарними групами з'єднання обмоток. Якщо ж обидва трансформатори мають парну або непарну групу з'єднання, то практично змінивши маркування кінців фазних обмоток, групи можна зробити однаковими і виконати умову підключення трансформаторів на паралельну роботу.

Паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації

Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації: $k_I < k_{II}$ і, відповідно, $E_{2I} > E_{2II}$. В даному випадку в контурі вторинних обмоток трансформаторів різниця ЕРС буде відрізнятися від нуля $\Delta E = E_{2I} - E_{2II}$. Під дією ΔE в обмотках буде протікати зрівнювальний струм, який визначається (3.78). Зрівнювальний струм у вторинних обмотках трансформаторів буде мати різні напрямки (рис. 3.51): якщо в першому трансформаторі він протікає від початку обмотки до кінця; то в другому – від кінця до початку. Зрівнювальний струм $I_{\text{вир}}$ для першого трансформатора I є індуктивним, для другого трансформатора II – ємнісним.

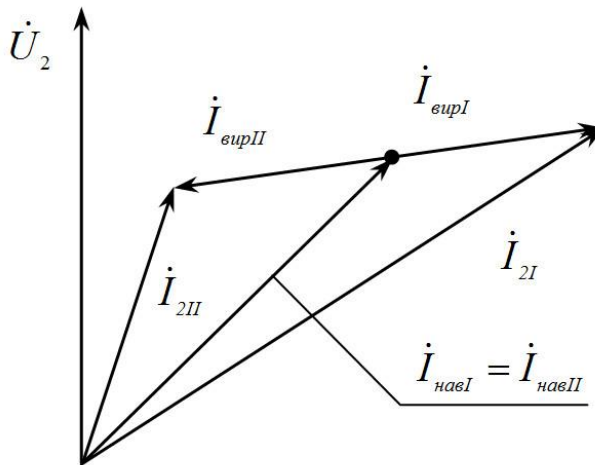


Рис. 3.51 – Спрощена векторна діаграма струмів вторинних обмоток трансформаторів при паралельній роботі

Зрівнювальні струми змінюють напруги вторинних обмоток за рахунок падіння напруги таким чином, що встановлюється деяка напруга $E_{2I} > U_2 > E_{2II}$. При підключенні навантаження, струми навантаження $I_{навл}$ і $I_{навлII}$ сумуються зі зрівнювальними струмами, що викликає нерівність результуючих струмів і нерівномірне навантаження трансформаторів. Значення зрівнювального струму залежить від різниці коефіцієнтів трансформації. При паралельній роботі трансформаторів припустимою є відмінність коефіцієнтів трансформації на 0,5%, для трансформаторів з $k < 3$ і трансформаторів власних потреб електростанцій – на 1,0%.

Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання

Розглянемо паралельну роботу трансформаторів з різними напругами короткого замикання при дотриманні інших умов включення.

Нехтуючи намагнічувальними струмами і використовуючи спрощену схему заміщення трансформатора, схему паралельної роботи трансформаторів можна показати у вигляді, представленому на рисунку 3.52

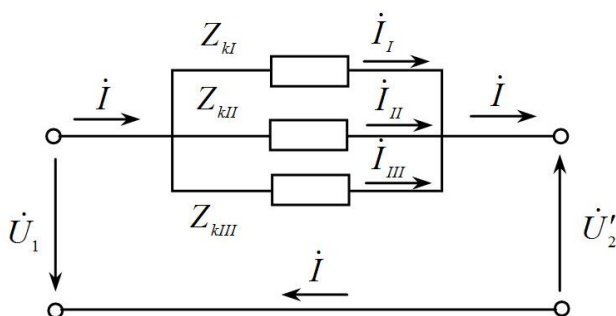


Рис. 3.52 – Спрощена схема паралельної роботи трансформаторів

Зі схеми видно, що падіння напруги у всіх трансформаторів однакові і дорівнюють

$$\Delta U = U'_{20} - U'_2 = IZ, \quad (3.80)$$

де I – загальний струм навантаження;

Z – еквівалентний повний опір обмоток трансформаторів.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{kl}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}}} = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}$$

Струми окремих трансформаторів

$$I_I = \frac{\Delta U}{Z_{kl}} = \frac{1}{Z_{kl} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}; I_{II} = \frac{\Delta U}{Z_{kII}} = \frac{1}{Z_{kII} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}; I_{III} = \frac{\Delta U}{Z_{kIII}} = \frac{1}{Z_{kIII} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}$$

У загальному випадку ці струми не співпадають за фазою, однак на практиці ці зсуви за фазою незначні і можна прийняти

$$I = I_I + I_{II} + I_{III}$$

Таким чином, підставивши відповідні значення Z_k і змінивши струми на відповідні їм повні потужності, отримаємо

$$S_i = \frac{S}{\frac{u_{ki\%}}{S_{ni}} \sum_n \frac{S_{in}}{u_{kn\%}}}$$

Після визначення повних потужностей для кожного трансформатора і їх порівняння маємо співвідношення потужностей трансформатора при паралельній роботі

$$S_I : S_{II} : S_{III} = \frac{1}{u_{kl\%}} : \frac{1}{u_{kII\%}} : \frac{1}{u_{kIII\%}} \quad (3.81)$$

Зі співвідношення видно, що відносні потужності (навантаження) паралельно працюючих трансформаторів обернено пропорційні їх напругам к.з. Інакше кажучи, при нерівності напруг к.з. паралельно працюючих трансформаторів більше навантажується трансформатор з меншою напругою к.з. В результаті це веде до перевантаження одного трансформатора (з меншим $u_{k\%}$) і недовантаження 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 те, що практично не завжди можна підібрати трансформатори з однаковими напругами к.з., ДСТУ 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 більша, чим більше ці трансформатори відрізняються одне від одного за потужністю. Тому ДСТУ рекомендує, щоб відношення номінальних потужностей трансформаторів, включених паралельно, було не більш ніж 3:1.

3.6 СПЕЦІАЛЬНІ ТИПИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Автотрансформатори

Автотрансформатором називається такий трансформатор, у якого обмотка нижчої напруги електрично (гальванічно) зв'язана з обмоткою вищої напруги. Автотрансформатори використовуються в тих випадках, коли за умовами експлуатації необхідно здійснити передачу енергії з незначною зміною напруги і струму.

Автотрансформатор, як і звичайний трансформатор, може бути підвищувальним (рис. 3.53, б) і понижувальним (рис. 3.53, а).

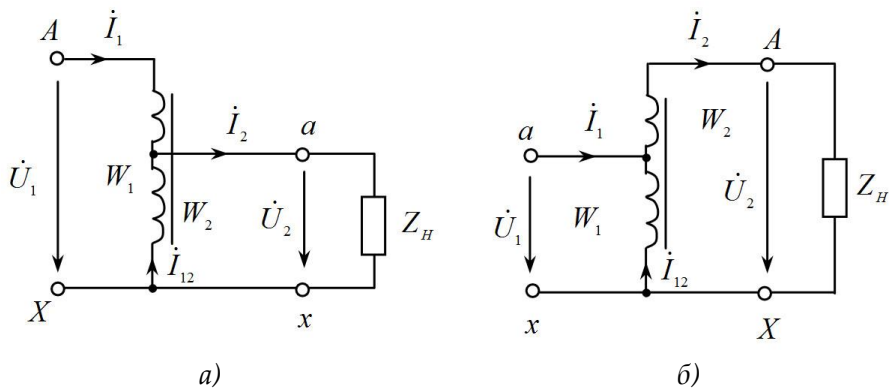


Рис. 3.53 – Однофазний понижувальний а) і підвищувальний б) автотрансформатори

Якщо кількість витків між затискачами А і Х (рис. 3.53) позначити W_1 , кількість витків між затискачами а і х – W_2 , то в автотрансформаторі співвідношення між напругами і струмами первинної і вторинної обмоток набувають вигляду, як у звичайному двохобмотковому трансформаторі:

$$U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1 \approx W_1 / W_2 = k.$$

Однак автотрансформатор в порівнянні з трансформатором має низку особливостей.

Струм $\dot{I}_{12}$, що протікає обмоткою $a-x$, дорівнює геометричній сумі первинного і вторинного струмів $\dot{I}_{12} = -\dot{I}_1 + \dot{I}_2$.

Нехтуючи струмом холостого ходу ($\dot{I}_0 = 0$), можна вважати, що струми $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_2$ знаходяться у протифазі і їх геометрична сума дорівнює арифметичній різниці. У понижувальному автотрансформаторі $\dot{I}_1 \leq \dot{I}_2$ та

$$I_{12} = I_2 - I_1. \quad (3.82)$$

У підвищувальному автотрансформаторі $\dot{I}_1 \geq \dot{I}_2$ та

$$I_{12} = I_1 - I_2. \quad (3.83)$$

Враховуючи припущення $\dot{I}_0 = 0$, $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1}$, для знижувального автотрансформатора отримаємо

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2(1 - W_2/W_1) = \dot{I}_2(1 - 1/k), \quad (3.84)$$

для підвищувального автотрансформатора

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1(1 - W_1/W_2) = \dot{I}_1(1 - 1/k). \quad (3.85)$$

В автотрансформаторі обмотки $A-a$ і $a-x$ магнітно врівноважені, тобто МРС обмоток рівні і протилежно направлені:

для знижувального автотрансформатора

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2(1 - W_2/W_1)W_2 = -\dot{I}_2(W_1 - W_2), \quad (3.86)$$

для підвищувального автотрансформатора

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1(1 - W_1/W_2)W_1 = -\dot{I}_2(W_1 - W_2). \quad (3.87)$$

Вирішуючи (3.82) відносно $\dot{I}_2$ і помноживши отриманий вираз на $\dot{U}_2$, отримаємо

$$I_2 U_2 = I_1 U_2 + I_{12} U_2 = I_1 U_2 + I_2 U_2 (1 - 1/k) \quad (3.88)$$

або

$$S_2 = S_{el} + S_{em}. \quad (3.89)$$

Повна (номінальна) потужність S_2 автотрансформатора, яка називається прохідною потужністю, за виразом (3.89) складається з електричної потужності S_{el} , яка передається з первинної мережі до вторинної електричним шляхом, та електромагнітної потужності S_{em} , яка передається з первинної мережі до вторинної електромагнітним шляхом і називається розрахунковою потужністю.

Враховуючи, що в двообмотковому трансформаторі $S_{el} = 0$ і $S_2 = S_{em}$, можна зробити висновок, що розрахункова потужність автотрансформатора менше, ніж потужність двообмоткового трансформатора при такій самій прохідній потужності, що передається з первинної мережі до вторинної. Таким чином, автотрансформатор можна виконати меншої маси і габаритів. Відношення цих потужностей визначає коефіцієнт вигідності

$$k_{виг} = S_{em} / S_2 = 1 - 1/k \quad (3.90)$$

Чим ближче значення коефіцієнта трансформації k до одиниці, тим менше розрахункова потужність автотрансформатора і тим вигідніше використовувати його з точки зору маси, габаритних розмірів і втрат потужності. Наприклад, при $k = 1,1$ розрахункова потужність автотрансформатора зменшується в 10 разів, а при $k = 10$ – майже така сама, як і в двообмотковому трансформаторі. Електричні втрати в обмотках автотрансформатора за тих самих причин можуть бути суттєво зменшені порівняно з двообмотковим трансформатором.

Практично зниження розрахункової потужності в автотрансформаторі відбувається за рахунок того, що в понижувальному автотрансформаторі обмотку, по якій протікає струм первинної мережі, а в підвищувальному – обмотку, по якій протікає струм вторинної мережі, розраховують на різницю напруги первинної і вторинної мережі, а не на повну напругу, як у двообмотковому трансформаторі. Відповідно, обмоткою, до якої прикладається вхідна і вихідна напруга, протікає струм, який дорівнює різниці струмів первинної і вторинної мережі, а не повному струму. Завдяки цьому, автотрансформатори знайшли широке розповсюдження при з'єднанні високовольтних електричних мереж, для пуску двигунів змінного струму великої потужності, в схемах автоматики і т.д.

В автотрансформаторі за рахунок зменшення маси активних матеріалів порівняно з двообмотковим трансформатором такої самої номінальної потужності втрати і зміна напруги менші, а ККД вище.

В той же час, автотрансформатор має низку недоліків, які обмежують його використання:

- оскільки напруга короткого замикання автотрансформатора в $\frac{1}{k_{виг}}$ разів менше напруги короткого замикання трансформатора, струм короткого замикання автотрансформатора у стільки ж разів

перебільшує струм короткого замикання двохобмоткового трансформатора;

- можливість появи високої напруги на стороні низької напруги внаслідок електричного зв'язку між обмотками, що небезпечно для обладнання і обслуговуючого персоналу;

- необхідність додаткової ізоляції мережі низької напруги автотрансформатора, яка повинна бути такою самою, як і ізоляція мережі високої напруги.

Внаслідок вказаних недоліків, автотрансформатори використовуються при необхідності порівняно невеликої зміни напруги і струмів (при $k \leq 2,5 \dots 3$), коли здорожчання ізоляції мережі низької напруги окупається зменшенням втрат і маси активних матеріалів автотрансформатора.

У трифазних установках обмотки автотрансформаторів зазвичай з'єднують за схемою «зірка». При цьому для усунення впливу третіх гармонійних складових магнітного потоку і ЕРС фаз використовується спеціальна обмотка малої потужності, яка з'єднується за схемою “трикутник”. При з'єднанні обмотки за схемою “трикутник”, коефіцієнт трансформації може змінюватися в межах $k = 1 \dots 2$, тому таке з'єднання обмоток використовується рідко.

В енергетичних системах використовуються триобмоткові автотрансформатори, в яких обмотки вищої і середньої напруги з'єднуються за схемою “зірка”, а обмотка нижчої напруги має з іншими обмотками трансформаторний зв'язок і з'єднується за схемою “трикутник”.

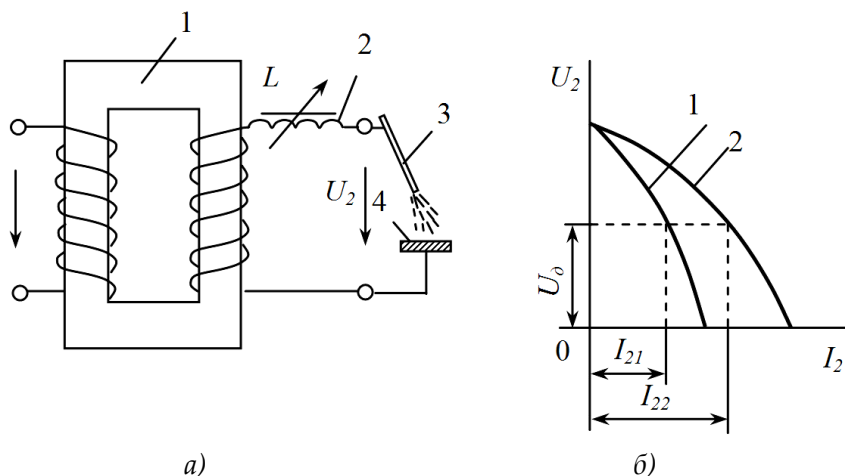
Зварювальні трансформатори

Зварювальні трансформатори – понижувальні однофазні сухі трансформатори із вторинною напругою при холостому ході 60–75 В. Така напруга необхідна для надійного запалювання електричної дуги. При номінальному навантаженні вторинна напруга зменшується до 30 В.

При роботі зварювальних трансформаторів коротке замикання є нормальним експлуатаційним режимом. Тому, для обмеження струму короткого замикання і стійкого горіння дуги, такий трансформатор повинен мати різко спадаючу зовнішню характеристику, а коло зварювального струму повинно мати значну індуктивність. Для цього в

зварювальних трансформаторах первинну і вторинну обмотки розміщують на різних стрижнях магнітопроводу, внаслідок чого значення опору короткого замикання Z_k і напруги u_k у таких трансформаторів в декілька разів більше, ніж у звичайних силових трансформаторів.

Зазвичай в зварювальних трансформаторах послідовно із вторинною обмоткою включають реактор L із змінною індуктивністю (рис. 3.54, а). Регулюючи індуктивність реактора (змінюючи повітряний зазор в його магнітопроводі), змінюють форму зовнішньої характеристики 1 або 2 трансформатора (рис. 3.54, б) і струм дуги I_{21} або I_{22} , що відповідає напрузі горіння дуги U_o .



1 – трансформатор; 2 – реактор із змінною індуктивністю;
3 – електрод; 4 – деталь

Рис. 3.54 – Електрична схема (а) і зовнішні характеристики (б) зварювального трансформатора

У деяких конструкціях реактор безпосередньо вбудовують в зварювальний трансформатор. Такий трансформатор має три обмотки: первинну 1 (рис. 3.55), вторинну 3 і обмотку реактора 4, які розташовані на загальному магнітопроводі. Середнє ярмо 2 є загальним для кіл трансформатора і реактора. Обмотки 3 і 4 включені таким чином, що магнітний потік, який утворюється обмоткою реактора 4 в ярмі 2, направлений зустрічно основному потоку, створюваному первинною обмоткою 1.

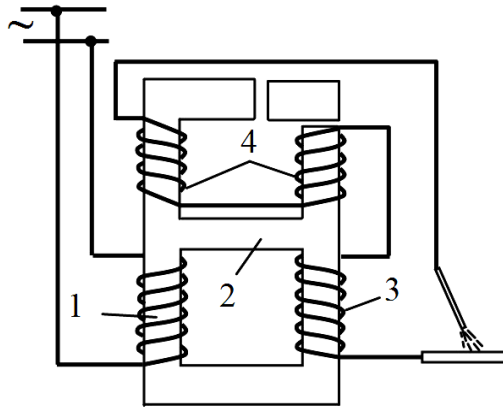


Рис. 3.55 – Електромагнітна схема зварювального трансформатора з вбудованим реактором

Завдяки цьому істотно зростає магнітне розсіювання в трансформаторі при порівняно невеликому поперечному перерізі ярма 2.

Багатообмоткові трансформатори

Окрім двохобмоткових силових трансформаторів промисловість випускає велику кількість трансформаторів, що мають три обмотки. Такі трансформатори використовуються, наприклад, на електричних станціях і підстанціях для живлення розподільних мереж з різною номінальною напругою з метою економії капітальних витрат за рахунок меншої кількості трансформаторів. Крім того, випускається багато малопотужних трансформаторів, що мають декілька обмоток, розрахованих на різну напругу. У таких трансформаторів всі обмотки розташовуються на одному магнітопроводі, за рахунок чого і досягається економія витрат. В таких трансформаторах електромагнітні процеси можуть протікати трохи інакше, ніж в двохобмоткових трансформаторах, через магнітний зв'язок всіх обмоток. Розглянемо ці відмінності і методику аналізу електромагнітних процесів на прикладі трьохобмоткового трансформатора. Конструктивна структура такого трансформатора показана на рисунку 3.56.

На кожному стрижні трансформатора розташовуються три обмотки, причому ближче до стрижня розташовується обмотка нижчої напруги. Трьохобмоткові трансформатори, як і двохобмоткові, в більшості випадків виконуються як трифазні.

Розглянемо електромагнітні процеси в трифазному трансформаторі, вважаючи режим його роботи симетричним і сталим. Виконаємо приведення другої і третьої обмотки до первинної подібно до того, як це виконувалось для двохобмоткового трансформатора, тобто через коефіцієнти трансформації.

Відповідно,

$$k_{12} = \frac{W_1}{W_2} \text{ і } k_{13} = \frac{W_1}{W_3}$$

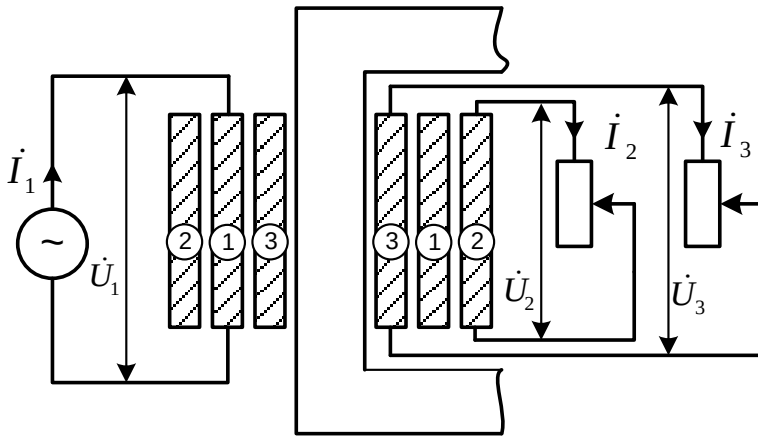


Рис. 3.56 – Трьохобмотковий трансформатор

Рівняння напруги для однойменних фазних обмоток будуть мати вигляд (індекси 1, 2, 3 визначають номер обмотки)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2; \\ \dot{U}'_3 = \dot{E}'_3 - \dot{I}'_3 Z'_3 \end{cases} \quad (3.91)$$

ЕРС, які індукуються магнітним потоком в осерді магнітопроводу, у всіх приведених обмотках однакові і дорівнюють

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = \dot{E}'_3 = -Z_i \dot{I}_0 \quad (3.92)$$

де

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 \quad (3.93)$$

Намагнічуючий струм $\dot{I}_0$ визначається як результат взаємодії МРС всіх трьох обмоток трансформатора.

Грунтуючись на наведених рівняннях (3.91)–(3.93), отримуємо точну схему заміщення для трьохобмоткового трансформатора, яка наведена на рисунку 3.57.

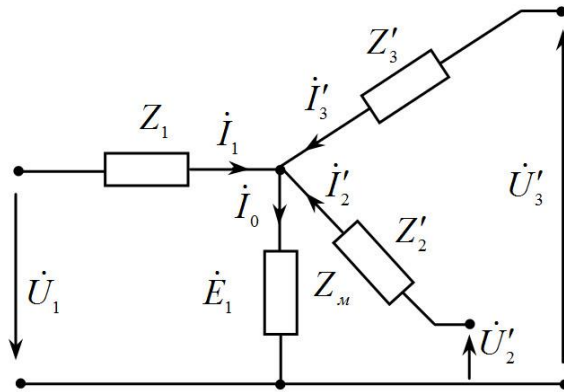


Рис. 3.57 – Точна схема заміщення трьохобмоткового трансформатора

Для спрощення аналізу схеми заміщення можемо прийняти $I_0 = 0$, отримана спрощена схема заміщення наведена на рисунку 3.58.

Наведені схеми заміщення, на відміну від схем заміщення двохобмоткового трансформатора, мають дві паралельно включені вторинні обмотки, які утворюють відповідні електричні кола. Тому зміна навантаження однієї вторинної обмотки впливає на напругу іншої вторинної обмотки, оскільки при цьому змінюється падіння напруги первинної обмотки $I_1 Z_1$.

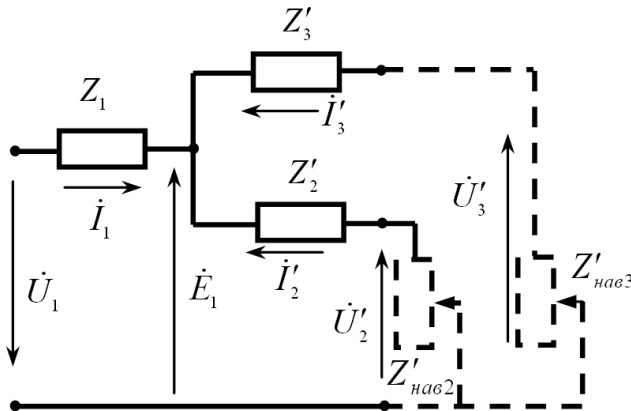


Рис. 3.58 – Спрощена схема заміщення трьохобмоткового трансформатора

Векторні діаграми трьохобмоткового трансформатора можна скласти на основі схем заміщення, наведених на рисунках 3.57 та 3.58; вони мають вигляд, показаний на рисунку 3.59.

Параметри схеми заміщення розраховують або визначають експериментально, так само як і в двохобмотковому трансформаторі.

При дослідному визначенні Z_1, Z'_2, Z'_3 проводять три досліді короткого замикання:

1) при замкнутій накоротко обмотці 2 і розімкненій обмотці 3 знижена напруга підводиться до обмотки 1 і визначається як

$$Z_{k12} = r_{k12} + jx_{k12} = Z_1 + Z'_2 = r_1 + r'_2 + j(x_1 + x'_2)$$

2) при замкнутій накоротко обмотці 3 і розімкненій обмотці 2 знижена напруга підводиться до обмотки 1 і визначається як

$$Z_{k13} = r_{k13} + jx_{k13} = Z_1 + Z'_3 = r_1 + r'_3 + j(x_1 + x'_3)$$

3) при замкнутій накоротко обмотці 3 і розімкненій обмотці 1 знижена напруга підводиться до обмотки 2 і визначається як

$$Z_{k23} = r_{k23} + jx_{k23} = Z'_2 + Z'_3 = r'_2 + r'_3 + j(x'_2 + x'_3)$$

Сумісне вирішення наведених раніше рівнянь дозволяє визначити Z_1, Z'_2, Z'_3 і їх складові

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{Z_{k12} + Z_{k13} - Z'_{k23}}{2}, \\ Z'_2 = \frac{Z_{k12} - Z_{k13} + Z'_{k23}}{2}, \\ Z'_3 = \frac{Z_{k13} - Z'_{k23} + Z'_{k23}}{2}. \end{cases} \quad (3.94)$$

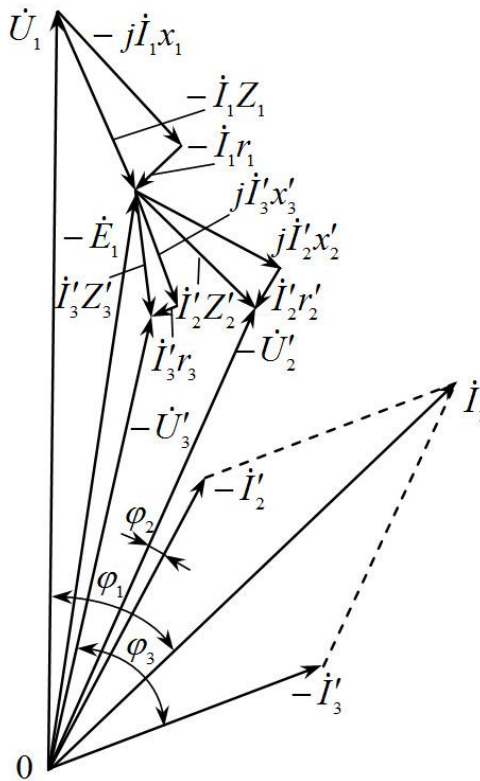


Рис. 3.59 – Векторна діаграма трьохобмоткового трансформатора

Слід зазначити, що x_1, x_2', x_3' не є дійсними індуктивними опорами відповідних обмоток, а є еквівалентними індуктивними опорами, обумовленими індуктивностями обмоток і взаємними індуктивностями всіх трьох пар обмоток, і можуть мати від'ємні значення. Це пояснюється тим, що індуктивний опір розсіювання обмотки, розташованої між двома іншими, близький до нуля або має невелике від'ємне значення, що формально еквівалентно ємнісному опору, а фізично обумовлено особливостями розподілу магнітних полів розсіювання.

Потужності обмоток трьохобмоткового трансформатора дорівнюють $S_1 = mU_1 I_1$; $S_2 = mU_2 I_2$; $S_3 = mU_3 I_3$.

У випадку, коли обмотка 1 є первинною, то потужності знаходяться у співвідношенні $S_1 \leq S_2 + S_3$, оскільки коефіцієнти потужності

вторинних обмоток зазвичай різні, струми I_2 та I_3 зсунуті по фазі, тому $I_1 \leq I_2 + I_3$.

Сьогодні трьохобмоткові трансформатори випускаються з обмотками, що мають рівні номінальні потужності по 100% кожна. При цьому трансформатор може віддавати 100% потужностей в одну з вторинних обмоток або сумарну потужність, рівну 100%, в обидві вторинні обмотки. Раніше випускалися також трансформатори з наступними співвідношеннями номінальних потужностей обмоток:

100%	100%	67%
100%	67%	100%
100%	67%	67%

Трифазні трьохобмоткові трансформатори мають схеми з'єднання $Y/Y-n/\Delta$ - 0-11 або $Y-n/\Delta/\Delta$ - 11-11, а однофазні - $Y/Y/Y$ - 0 - 0.

Трьохобмоткові трансформатори з двома первинними і однією вторинною обмоткою (рис. 3.60) виготовляються для експлуатації на потужних електростанціях.

При цьому первинні обмотки мають однакову номінальну напругу і до них приєднується по одному потужному генератору, а вторинна обмотка, яка має дві паралельні гілки, з'єднується через підстанцію з лініями електропередачі. Трансформатори виконуються однофазними і з'єднуються в трифазну групу.

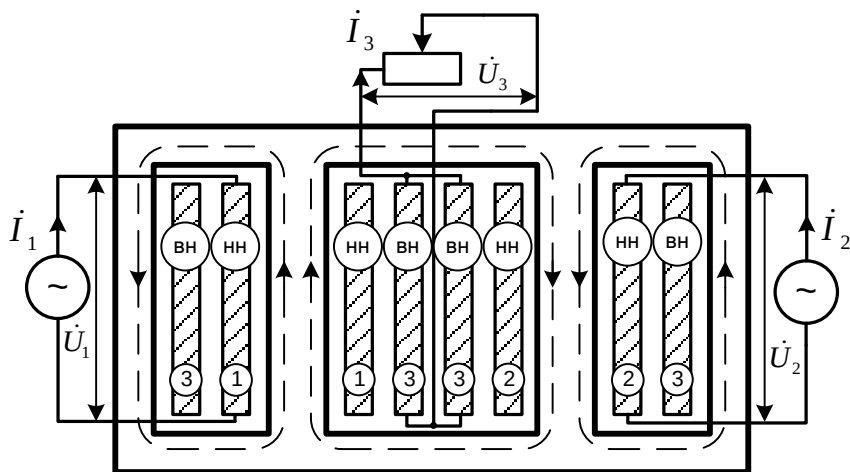


Рис. 3.60 – Однофазний трьохобмотковий трансформатор з двома первинними обмотками

При такому конструктивному рішенні трансформатора полегшується виготовлення первинних обмоток, які мають великі струми, і у разі короткого замикання на затискачах одного генератора між двома генераторами діють активні та індуктивні опори двох первинних обмоток трансформатора, що призводить до зменшення струму короткого замикання.

Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори використовують головним чином для підключення електровимірювальних приладів в кола змінного струму високої напруги. При цьому електровимірювальні прилади виявляються ізольованими від кіл високої напруги, що забезпечує безпечну роботу обслуговуючого персоналу. Крім того, вимірювальні трансформатори дозволяють розширювати межі вимірювання приладів, тобто вимірювати великі струми і напругу за допомогою порівняно нескладних приладів, розрахованих для вимірювання малих струмів і напруг. У ряді випадків вимірювальні трансформатори служать для підключення до кіл високої напруги обмоток реле, що забезпечують захист електричних установок від аварійних режимів.

Вимірювальні трансформатори поділяють на два типи – трансформатори напруги і трансформатори струму. Перші використовуються для включення вольтметрів і інших приладів, що реагують на значення напруги (наприклад, котушок напруги ватметрів, лічильників, фазометрів і різних реле). Інші – для включення амперметрів і струмових котушок вказаних приладів.

Вимірювальні трансформатори виготовляють потужністю від п'яти до декількох сотень вольтампер; вони розраховані для спільної роботи із стандартними приладами (амперметрами на 1; 2; 2,5 і 5 А, вольтметрами на 100 і $100\sqrt{3}$ В).

Трансформатор напруги виконують у вигляді двообмоткового знижувального трансформатора (рис. 3.61, а). Для забезпечення безпечної роботи обслуговуючого персоналу вторинну обмотку ретельно ізолюють від первинної і заземлюють. Умовне позначення трансформатора напруги таке ж, як двообмоткового трансформатора.

Оскільки опори обмоток вольтметрів і інших приладів, що підключаються до трансформатора напруги, великі, то він практично

працює в режимі холостого ходу. У цьому режимі можна з достатнім ступенем точності вважати, що $U_1 = U'_2 = U_2 k$.

Насправді струм холостого ходу I_0 (а також невеликий струм навантаження) створює в трансформаторі падіння напруги, тому, як видно з векторної діаграми (рис 3.61, б), $U'_2 \neq U_1$ і між векторами цієї напруги є деякий зсув по фазі δ_u . В результаті при вимірюваннях утворюються деякі похибки.

У вимірювальних трансформаторах напруги розрізняють два види похибок:

а) відносну похибку напруги

$$\gamma_u = [(U_2 k - U_1) / U_1] 100\% \quad (3.95)$$

б) кутову погрішність δ_u ; за її значення приймають кут між векторами $\dot{U}_1$ і $-\dot{U}'_2$.

Вона впливає на результати вимірювань, виконаних за допомогою ватметрів, лічильників, фазометрів і інших приладів, показання яких залежать не тільки від сили струму і напруги, але і від кута зсуву фаз між ними. Кутова погрішність вважається позитивною, якщо вектор $\dot{U}'_2$ випереджає вектор $\dot{U}_1$.

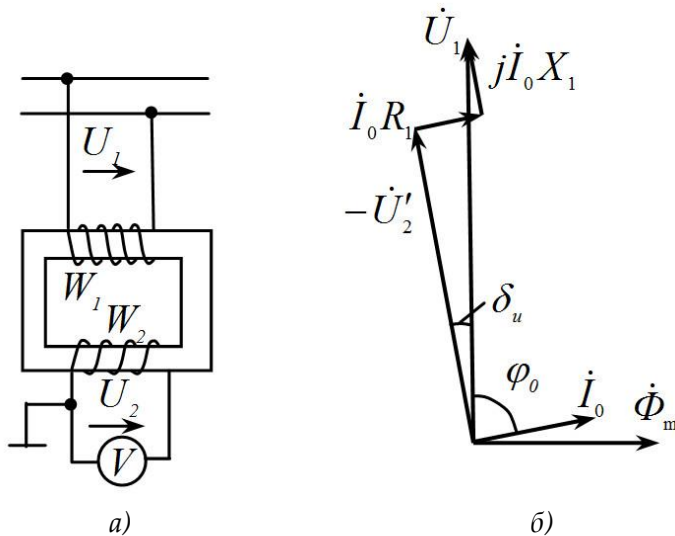


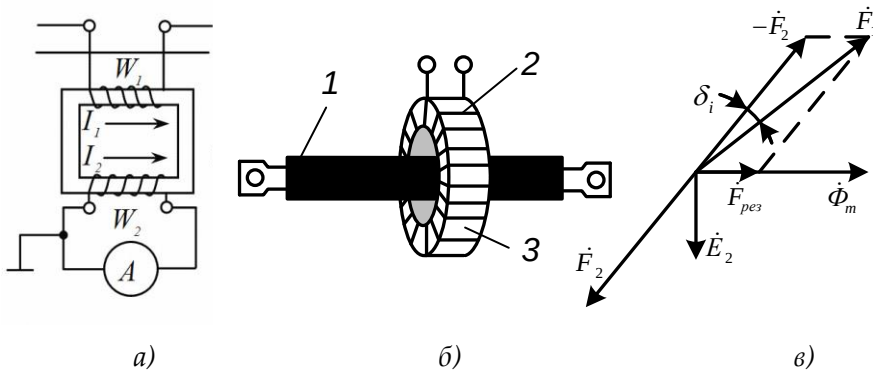
Рис. 3.61 – Схема включення (а) і векторна діаграма вимірювального трансформатора напруги (б)

Залежно від значення похибок, що припускаються, стаціонарні трансформатори напруги поділяють на три класи точності: 0,5; 1 і 3, а лабораторні – на чотири: 0,05; 0,1; 0,2 і 0,5. Позначення класу відповідає значенню відносної похибки γ_u при номінальній напрузі $U_{1ном}$. Кутова похибка їх складає 20–40 кут. хв.

Трансформатори напруги, що випускаються промисловістю, зберігають клас точності при зміні первинної напруги від 80 до 120% від номінальної.

Для зменшення похибок γ_u і δ_u опори обмоток трансформатора Z_1 і Z_2 виконують по можливості малими, а магнітопровід виконують з високоякісної сталі достатньо великого поперечного перерізу, щоб в робочому режимі він не був насичений. Завдяки цьому забезпечується значне зменшення струму холостого ходу.

Трансформатор струму виконують у вигляді двообмоткового підвищувального трансформатора (рис. 3.62) або у вигляді прохідного трансформатора, у якого первинною обмоткою служить провід, що проходить через вікно магнітопровода.



1 – мідний стрижень (первинна обмотка); 2 – вторинна обмотка;
3 – магнітопровід

Рис. 3.62 – Схема включення вимірювального трансформатора струму (а), загальний вигляд прохідного ізолятора (б) і векторна діаграма (в)

У деяких конструкціях магнітопровід і вторинна обмотка змонтовані на прохідному ізоляторі, що служить для введення високої напруги в силовий трансформатор або іншу електричну установку.

Первинною обмоткою трансформатора служить мідний стрижень, що проходить усередині ізолятора (рис. 3.62, б).

Опори обмоток амперметрів і інших приладів, що підключаються до трансформатора струму, зазвичай малі. Тому він практично працює в режимі короткого замикання, при якому струми I_1 і I'_2 у багато разів більше струму I_0 , і з достатнім ступенем точності можна вважати, що $I_1 = I'_2 = I_2/k$.

Насправді через наявність струму холостого ходу в даному трансформаторі між векторами цих струмів є деякий кут, відмінний від 180° (рисунк 3.62, в). Це створює відносну струмову похибку

$$\gamma_i = [(I_2 k - I_1) / I_1] 100\% \quad (3.96)$$

і кутову похибку, вимірювану кутом δ_i , між векторами $\dot{I}_1$ і $-\dot{I}'_2$.

Похибка δ_i , вважається позитивною, якщо вектор $-\dot{I}'_2$ випереджає вектор $\dot{I}_1$.

Залежно від значення похибок, що допускаються, трансформатори струму поділяють на п'ять класів точності: стаціонарні — 0,2; 0,5; 1; 3; 10 і лабораторні — 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2. Наведені цифри відповідають припустимій для даного класу струмовій похибці при номінальному значенні струму. Кутова похибка складає 10–120 кут. хв.

Для зменшення струмової і кутової похибки магнітопровід трансформатора струму виготовляють з високоякісної сталі достатньо великого перерізу, щоб в робочому режимі він був не насичений ($B = 0,06\text{--}0,1$ Тл). За цих умов струм, що намагнічує, буде малий.

Слід зазначити, що розмикання кола вторинної обмотки трансформатора струму неприпустимо. Трансформатор переходить в режим холостого ходу і його результуюча МРС, в робочому режимі рівна $\dot{F}_{рез} = \dot{F}_1 - \dot{F}_2$ (рис. 3.62, в), стає $\dot{F}_{рез} = \dot{F}_1$. В результаті різко (у десятки і сотні разів) зростає магнітний потік в магнітопроводі, а індукція в ньому досягає значення $B > 2$ Тл, що приводить до сильного зростання магнітних втрат в сталі; при цьому трансформатор може згоріти. Ще більшу небезпеку становить різке підвищення напруги на затискачах вторинної обмотки до декількох сотень і навіть тисяч вольт. Для запобігання режиму холостого ходу при відключенні приладів слід замикати вторинну обмотку трансформатора струму накоротко.

? КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що називають трансформатором?
2. Яке призначення магнітної системи та обмоток трансформатора і як вони разом називаються?
3. Як класифікуються магнітопроводи та обмотки сучасних трансформаторів.
4. Як складаються рівняння ЕРС та струмів трансформатора?
5. Які величини відносяться до параметрів схеми заміщення трансформатора?
6. Якими шляхами можна визначати параметри схеми заміщення трансформатора?
7. Що слід розуміти під дослідним, а що під аварійним КЗ трансформатора?
8. Яка напруга називається напругою КЗ трансформатора?
9. Що слід розуміти під зміною вторинної напруги трансформатора?
10. Що таке енергетична діаграма трансформатора?
11. Які втрати мають місце у трансформаторі при навантаженні?
12. Як визначається ККД та його максимальне значення у трансформатора?
13. Що слід розуміти під групою з'єднання обмоток трансформатора?
14. Які умови ввімкнення трансформаторів на паралельну роботу?
15. Який трансформатор називається трьохобмотковим?
16. На яку потужність можуть розраховуватись окремі обмотки трьохобмоткового трансформатора?
17. Який трансформатор називається автотрансформатором?
18. Які недоліки автотрансформатора у порівнянні з трансформатором?
19. В чому полягає принцип перемикання числа витків без збудження?
20. В чому полягає принцип регулювання під навантаженням?
21. Що таке перехідний процес у трансформаторі?
22. Пояснити, що відбувається при вмиканні ненавантаженого трансформатора до мережі.
23. Пояснити, що відбувається при раптовому КЗ на вторинній обмотці трансформатора.

4 АСИНХРОННІ МАШИНИ

4.1 БУДОВА І ПРИНЦИП ДІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Робота асинхронних машин заснована на взаємодії обертового магнітного поля статора зі струмами в обмотці ротора.

На відміну від синхронних машин швидкість обертання ротора асинхронної машини залежить не тільки від частоти прикладеної напруги, але й і від величини навантаження (протидіючого моменту на валу).

Асинхронна машина має властивість зворотності і може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Однак найбільше практичне застосування отримали асинхронні двигуни (кольорова вкладка, рис. 4.1–4.4). Маючи переваги перед іншими електродвигунами простою конструкцією і надійністю в роботі, асинхронні двигуни в даний час є основним типом електродвигунів, що застосовуються для приводу різноманітних механізмів промисловості, на будівництві, в сільському господарстві.

Будова і принцип дії асинхронних двигунів

Асинхронний двигун складається з нерухомої частини – статора і рухомої – ротора. Статором є сталевий сердечник у вигляді порожнистого циліндра, що набирається з окремих листів електротехнічної сталі, ізолюваних між собою лаком. Усередині циліндра виштампувані пази, куди укладають обмотку статора. За будовою статор асинхронного двигуна майже нічим не відрізняється від статора синхронної машини. Обмотки статорів асинхронної і синхронної машин розраховують і виконують аналогічно.

Усередині статора поміщається ротор, що є сталевим циліндром, який набирають з окремих листів електротехнічної сталі, покритих ізоляційним лаком. Ротори бувають двох типів: короткозамкнуті і фазні. У пази короткозамкнутого ротора укладають обмотку у вигляді білячої клітки, що виконується з мідних стрижнів, яку з торцевих сторін замикають кільцями (кольорова вкладка, рис. 4.5). У двигунах невеликої потужності, до 100 кВт, білячу клітку виготовляють шляхом заливки пазів ротора алюмінієм під тиском. Білячу клітку від сталі

ротора не ізолюють, оскільки провідність провідників обмотки в десятки разів більше провідності сталі. При відливанні білячої клітки з алюмінію одночасно відливають і бічні кільця разом з вентиляційними лопатками (кольорова вкладка рис. 4.5).

У пази фазного ротора укладають трифазну обмотку, що виконується за типом обмотки статора. Розріз двигуна з фазним ротором представлений на рисунку 4.1 (кольорова вкладка).

Як правило, фазну обмотку ротора з'єднують в зірку. При цьому кінці обмотки сполучають разом, а початки приєднують до контактних кілець, на які встановлюють щітки, сполучені з пусковим реостатом. Схеми двигунів наведені на рисунку 4.6.

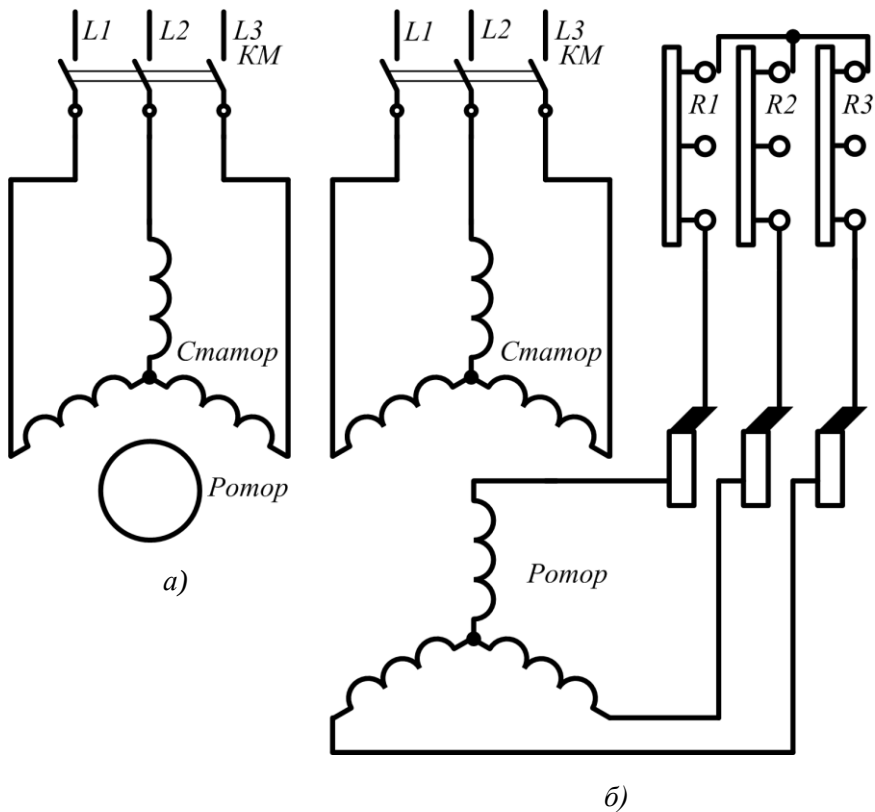


Рис. 4.6 – Схеми асинхронних двигунів:

а) – з короткозамкненим ротором;

б) – з фазним ротором

Виводи обмоток асинхронних двигунів позначають таким чином:

	початки	кінці
1-а фаза	C1	C4
2-а фаза	C2	C5
3-я фаза	C3	C6

Обмотки двигуна можуть бути з'єднані в зірку або в трикутник. Для зручності з'єднання обмоток в трикутник виводи обмоток приєднані до клемної колодки за схемою, що наведена на рисунку 4.7.

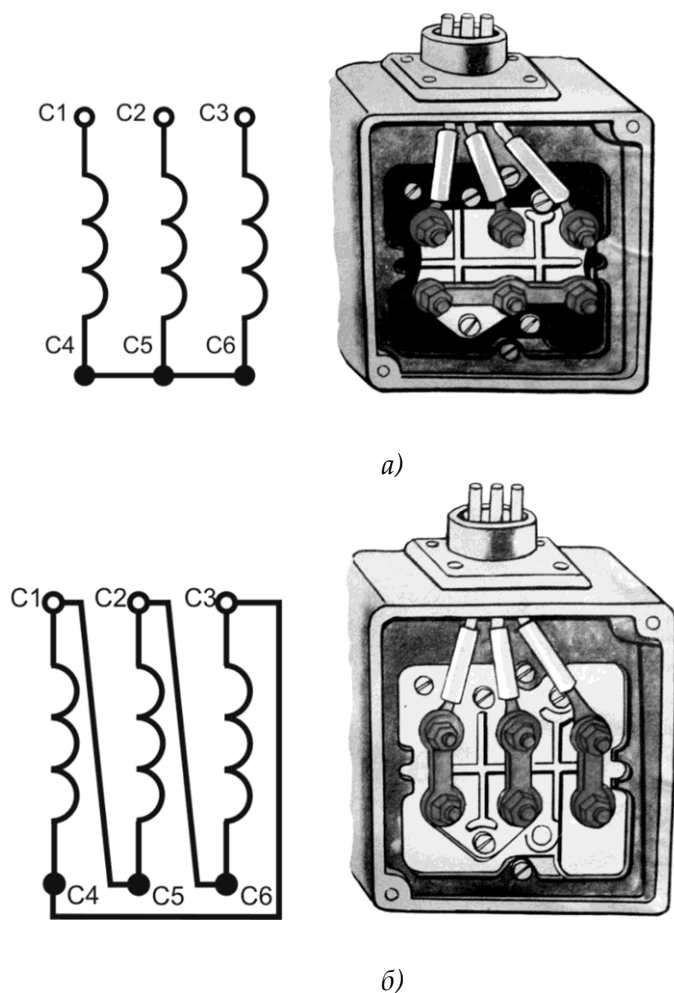


Рис. 4.7 – Схеми з'єднань обмоток статора асинхронних двигунів: а) – з'єднання обмоток у зірку; б) – з'єднання обмоток у трикутник

Якщо на паспорті двигуна написано 220/380 В і стоїть позначення Δ/Y , то це означає, що при лінійній напрузі в мережі 220 В обмотки потрібно з'єднати в трикутник, а при лінійній напрузі 380 В – в зірку. Виводи обмоток ротора позначають буквами P1, P2, P3.

Асинхронний трифазний двигун – найпоширеніший в промисловості і сільському господарстві. Близько 95% всіх двигунів – асинхронні.

Асинхронний двигун винайдений талановитим російським ученим М. О. Доливо-Добровольським у 1889 р. Простота пристрою, дешевизна, високий ККД, надійність в роботі сприяли його швидкому впровадженню у всі галузі господарства.

Принцип дії асинхронного двигуна заснований на взаємодії магнітного поля, що обертається, створюваного в трифазній обмотці статора, і провідників із струмом, з яких складається обмотка ротора. Швидкість обертання поля визначають з формули

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

Уявімо собі магнітне поле, що обертається, у вигляді кільця з двома постійними магнітами (рис. 4.8).

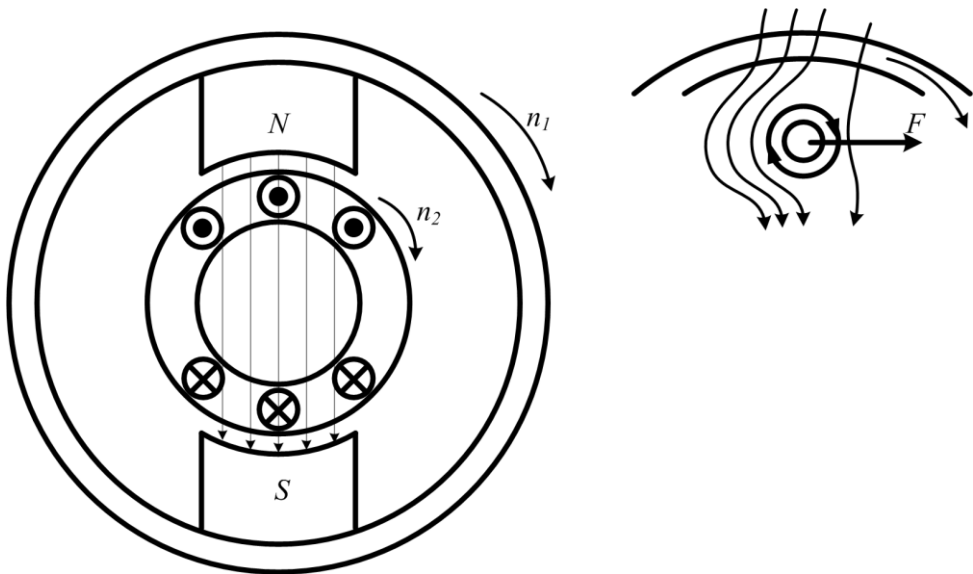


Рис. 4.8 – Принцип дії асинхронного двигуна

В середині кільця розміщена обмотка ротора у вигляді короткозамкнутої білячої клітки.

Магнітне поле статора, що обертається, індукуює в проводах обмотки ротора струми, напрям яких визначають за правилом правої руки. При цьому потрібно мати на увазі, що якщо магнітне поле обертається за годинниковою стрілкою, то відносно обертання провідника потрібно приймати проти годинникової стрілки.

У проводах, що знаходяться під північним полюсом, струм направлений до нас і напрям його позначимо крапкою.

При взаємодії магнітного поля статора і ротора (рис. 4.8) до проводу прикладена сила F , що примушує його переміщатися у бік руху поля статора.

Якщо поле статора обертається із швидкістю n_1 , яку називають синхронною, то ротор обертається з меншою швидкістю n_2 , яку називають асинхронною.

Відставання ротора від поля статора називають ковзанням і позначають буквою s .

Величина ковзання може бути визначена з рівняння

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (4.1)$$

Ковзання – основна змінна величина асинхронної машини, від якої залежить режим її роботи.

З формули ковзання можна вивести формулу оборотів ротора

$$n_2 = n_1(1 - s) \quad (4.2)$$

Число оборотів ротора n_2 при номінальному навантаженні, напрузі і частоті вказують на заводському щитку двигуна.

Величина ковзання асинхронних двигунів складає приблизно $s = 0,01 - 0,06$. Ковзання може бути визначене також у відсотках.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 \quad (4.3)$$

В асинхронного двигуна при нерухомому роторі ковзання має максимальне значення $s = 1$, оскільки $n_2 = 0$.

У початковий момент пуску в хід асинхронного двигуна, коли n_2 ще дорівнює нулю, $s = 1$.

Режим роботи: двигунний, генераторний, гальмівний

Згідно з принципом оборотності електричних машин асинхронні машини можуть працювати як в двигунному, так і у генераторному режимах. Крім того, можливий ще й режим електромагнітного гальмування – протидія.

Двигунний режим. При включенні обмотки статора в мережу трифазного струму виникає обертове магнітне поле, яке, зчіпляючись з короткозамкнутою обмоткою ротора, наводить у ній ЕРС. При цьому в стрижнях обмотки ротора з'являються струми. В результаті взаємодії цих струмів з обертовим магнітним полем на роторі виникають електромагнітні сили. Сукупність цих сил створює електромагнітний момент, що обертається, під дією якого ротор асинхронного двигуна приходить в обертання з частотою $n_2 < n_1$ в бік обертання поля статора. Якщо вал асинхронного двигуна механічно з'єднати з валом якогонебудь виконавчого механізму ВМ (верстата, підйомного крана і інше.), то обертовий момент двигуна M , подолавши момент, що протидіє (навантажувальний), $M_{\text{нав}}$ виконавчого механізму, призведе механізм до обертання. Отже, електрична потужність P_1 , що надходить у двигун з мережі, в основній своїй частині перетворюється в механічну потужність P_2 і передається до виконавчого механізму ВМ (рис. 4.9, б).

Цілком очевидно, що зі збільшенням навантаження моменту на валу асинхронного двигуна частота обертання ротора n_2 зменшується. Отже, ковзання асинхронного двигуна залежить від механічного навантаження на валу двигуна і може змінюватися в діапазоні $0 < s \leq 1$.

При включенні асинхронного двигуна в мережу в початковий момент часу ротор під впливом сил інерції нерухомий ($n_2=0$).

При цьому ковзання s дорівнює одиниці. У режимі роботи двигуна без навантаження на валу (режим холостого ходу) ротор обертається з частотою лише трохи меншою синхронної частоти обертання n_1 й ковзання дуже мало відрізняється від нуля ($s \approx 0$). Ковзання, відповідне номінальному навантаженню двигуна, називають номінальним ковзанням $s_{\text{ном}}$. Для асинхронних двигунів загального призначення $s_{\text{ном}} = 1-8\%$, при цьому для двигунів великої потужності $s_{\text{ном}} = 1\%$, а для двигунів малої потужності $s_{\text{ном}} = 8\%$.

Перетворивши вираз (4.1), отримаємо формулу для визначення асинхронної частоти обертання

$$n_2 = n_1(1 - s) \tag{4.4}$$

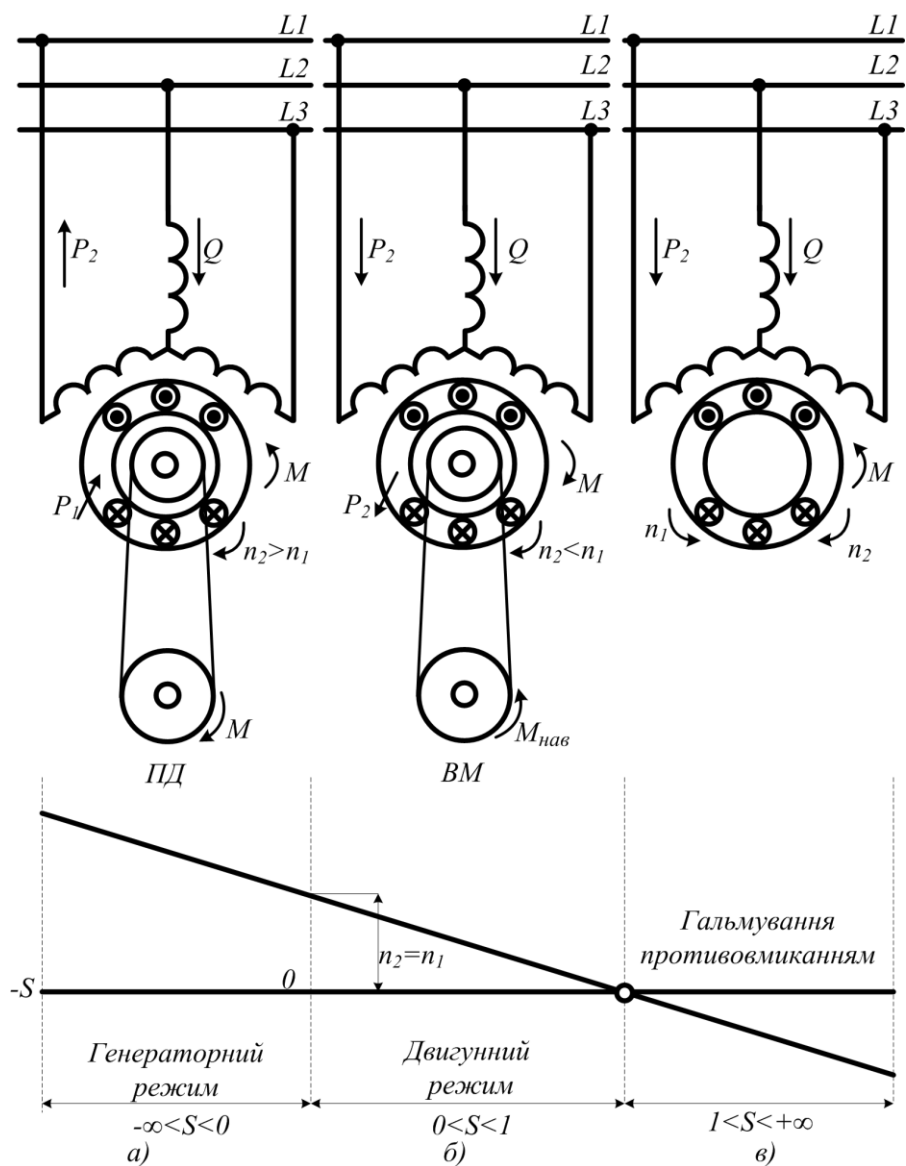


Рис. 4.9 – Режимы работы асинхронной машины

Генераторний режим. Якщо обмотки статора включити в мережу, а ротор асинхронної машини за допомогою приводного двигуна ПД (двигун внутрішнього згоряння, турбіна і т. п.), який є джерелом механічної енергії, обертати в напрямку обертання магнітного поля статора з частотою $n_2 > n_1$, то напрямок руху ротора щодо поля статора зміниться на зворотний (порівняно з руховим режимом роботи цієї машини), так як ротор обганятиме поле статора. При цьому ковзання стане від'ємним, а ЕРС, наведена в обмотці ротора, змінить свій напрямок. Електромагнітний момент на роторі M також змінить свій напрямок, тобто буде направлений зустрічно обертового магнітного поля статора і стане гальмуючим відносно до обертового моменту приводного двигуна M_1 (рис. 4.9, а). У цьому випадку механічна потужність приводного двигуна в основній своїй частині буде перетворена в електричну активну потужність P_2 змінного струму. Особливістю роботи асинхронного генератора є те, що його обертове магнітне поле створюється реактивною потужністю Q трифазної мережі в яку ввімкнений генератор і куди він віддає вироблену активну потужність P_2 . Отже, для роботи асинхронного генератора необхідне джерело змінного струму, при підключенні до якого відбувається зрушення генератора, тобто в ньому зрушується обертове магнітне поле.

Ковзання асинхронної машини у генераторному режимі може змінюватися в діапазоні $-\infty < s < 0$, тобто воно може приймати будь-які негативні значення.

Режим гальмівний. Якщо у працюючого трифазного асинхронного двигуна поміняти місцями будь-яку пару приєднувальних проводів, що підходять до статора з мережі, то обертове поле статора змінить напрямок обертання на зворотний. При цьому ротор асинхронної машини під дією сил інерції буде продовжувати обертання у попередньому напрямку. Іншими словами, ротор і поле статора асинхронної машини будуть обертатися в протилежних напрямках. У цих умовах електромагнітний момент машини, спрямований у бік обертання поля статора, буде чинити на ротор гальмівну дію (рис. 4.9, в). Цей режим роботи асинхронної машини називається електромагнітним гальмуванням (протидією). Активна потужність, що надходить з мережі в машину при цьому режимі, частково витрачається на компенсацію механічної потужності повороту ротора, тобто на його гальмування.

У режимі електромагнітного гальмування частота обертання ротора є негативною, а тому ковзання набуває додатні значення більше одиниці

$$s = \frac{[n_1 - (-n_2)]}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} > 1 \quad (4.5)$$

Ковзання асинхронної машини в режимі гальмування противми-канням може змінюватися в діапазоні $1 < s < +\infty$, тобто воно може приймати будь-які позитивні значення більше одиниці.

Узагальнюючи викладене про режими роботи асинхронної машини, можна зробити висновок: характерною особливістю роботи асинхронної машини є нерівність частот обертання магнітного поля статора n_1 і ротора n_2 , тобто наявність ковзання, оскільки тільки в цьому випадку обертове магнітне поле наводить в обмотці ротора ЕРС і на роторі виникає електромагнітний момент. При цьому кожному режиму роботи асинхронної машини відповідає певний діапазон змін ковзання, а отже, і частоти обертання ротора.

З розглянутих режимів роботи найбільше практичне застосування отримав двигунний режим асинхронної машини, тобто частіше використовують асинхронні двигуни, які складають основу сучасного електропривода, вигідно відрізняючись від інших електродвигунів простотою конструкції і високою надійністю. Тому теорію асинхронних машин прийнято викладати стосовно асинхронних двигунів.

4.2 РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ТРИФАЗНОЇ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

Асинхронні машини при нерухомому роторі

Електромагнітні процеси в асинхронному двигуні аналогічні процесам, що відбуваються в трансформаторі. Обмотку статора асинхронного двигуна можна розглядати як первинну обмотку трансформатора, а обмотку ротора – як вторинну.

Якщо до обмотки статора двигуна підвести напругу мережі U_1 , а обмотку ротора розімкнути, що можна зробити в двигуні з фазним ротором, то магнітне поле статора, що обертається, пересікаючи нерухомі обмотки статора і ротора, індукуватиме в них ЕРС E_1 і E_2 . Величини цих ЕРС визначають за формулами:

$$E_1 = 4,44W_1 f_1 K_{o\delta 1} \Phi_M \quad (4.6)$$

$$E_2 = 4,44W_2 f_1 K_{o\delta 2} \Phi_M, \quad (4.7)$$

де E_1 – ЕРС обмотки статора, В;

E_2 – ЕРС обмотки ротора, В;

$K_{o\delta 1}$ і $K_{o\delta 2}$ – відповідно обмотувальні коефіцієнти обмоток статора і ротора;

W_1 і W_2 – число витків обмоток статора і ротора;

Φ_M – основний магнітний потік, Вб;

f_1 – частота струму мережі, Гц.

При нерухомому роторі $f_2 = f_1$.

Так, як і для трансформатора, для асинхронного двигуна можна написати рівняння рівноваги ЕРС

$$\vec{U}_2 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_o r_1 + \vec{I}_o x_1 f_1, \quad (4.8)$$

де $\vec{E}_1$ – ЕРС, що індукована в обмотці статора основним магнітним потоком Φ_M ;

$\vec{I}_o r_1$ – падіння напруги на активному опорі обмотки статора r_1 ;

$\vec{I}_o x_1$ – падіння напруги на індуктивному опорі обмотки статора x_1 , що визначене величиною ЕРС розсіювання, як і в трансформаторі.

Режим роботи асинхронного двигуна, коли до обмотки статора підводять номінальну напругу при номінальній частоті, а обмотка ротора розімкнена, називають режимом холостого ходу. Цей режим аналогічний режиму холостого ходу трансформатора, але струм холостого ходу асинхронного двигуна більший, ніж трансформатора із-за повітряного зазору між сталлю статора і ротора, що збільшує магнітні потоки розсіювання. Якщо струм холостого ходу трансформатора складає 5–10 % номінального, то в асинхронному двигуні його величина може дорівнювати 20–60 % номінального. Векторна діаграма асинхронного двигуна в режимі холостого ходу аналогічна відповідній діаграмі трансформатора.

Коефіцієнтом трансформації ЕРС асинхронного двигуна k_e називають відношення ЕРС статора E_1 до ЕРС ротора E_2

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_{o\delta 1} W_1}{K_{o\delta 2} W_2} \quad (4.9)$$

Коефіцієнтом трансформації струмів називають відношення

$$k_i = \frac{m_1 K_{o\delta 1} W_1}{m_2 K_{o\delta 2} W_2} \quad (4.10)$$

Коефіцієнтом трансформації асинхронного двигуна називають співвідношення між коефіцієнтами трансформації ЕРС і струмів

$$k = k_e k_i \quad (4.11)$$

Тоді формули приведення вторинних величин до первинної обмотки матимуть, по аналогії з трансформатором, такий вигляд:

приведена ЕРС

$$E'_2 = k_e E_2 \quad (4.12)$$

приведений струм

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_i} \quad (4.13)$$

приведені опори

$$r'_2 = r_2 k \quad (4.14)$$

$$x'_2 = x_2 k \quad (4.15)$$

$$z'_2 = z_2 k \quad (4.16)$$

Якщо ротор асинхронного двигуна замкнути накоротко і загальмувати, а до обмотки статора підвести знижену напругу такої величини, щоб струми короткого замикання були рівні номінальним, то, включивши відповідні прилади в схему, можна провести дослід короткого замикання двигуна, аналогічний дослід короткого замикання трансформатора.

Для асинхронного двигуна в режимі короткого замикання можна намалювати трикутник короткого замикання, який буде майже таким же, як і в трансформатора.

Напруга короткого замикання в асинхронних двигунах дещо більше, ніж в трансформаторів, унаслідок великих магнітних потоків розсіяння.

Якщо ротор двигуна закорочений, але не загальмований, а до статора підведена номінальна напруга, то в початковий момент струм короткого замикання буде в 4–7 разів більше номінального. В цьому випадку ротор двигуна розкручується і струм короткого замикання швидко зменшується. Таким чином, асинхронний двигун з коротко-

замкнутим ротором в початковий момент пуску знаходиться в режимі короткого замикання.

Вважають, що в асинхронному двигуні, як і в трансформаторі, потужність при холостому ході йде на покриття втрат в сталі, а при короткому замиканні – на покриття втрат в міді.

Режим холостого ходу і короткого замикання

При розімкнутій обмотці ротора асинхронного двигуна з фазним ротором виникає режим х. х., подібний до режиму х. х. трансформатора. При цьому первинною обмоткою є обмотка статора, а вторинною – обмотка ротора. Під дією прикладеної до обмотки статора напруги мережі U_1 протікає струм х. х. I_0 , що створює обертове магнітне поле, велика частина магнітних ліній якого зв'язана з витками обмоток статора і ротора, утворюючи основний магнітний потік Φ . Частина магнітних ліній буде зв'язана лише з витками обмотки статора, утворюючи потік розсіювання Φ_{s1} .

Основний магнітний потік індукуює в обмотки статора та ротора ЕРС, фазні діючі значення яких

$$E_1 = 4,44k_{o\delta 1}W_1 f\Phi; \quad E_2 = 4,44k_{o\delta 2}W_2 f\Phi$$

де $k_{o\delta 1}$ і $k_{o\delta 2}$ – обмотувальні коефіцієнти;

W_1 і W_2 – числа витків обмоток статора і ротора відповідно.

Відношення

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{o\delta 1}W_1}{k_{o\delta 2}W_2} \quad (4.17)$$

називають коефіцієнтом трансформації ЕРС, який наближено визначають дослідним шляхом ставленням фазних значень ЕРС обмоток статора і ротора при х. х. Так як струм х. х. відносно малий, то ЕРС обмотки статора можна вважати приблизно рівною напрузі:

$$E_1 \approx U_1; \quad E_2 \approx U_2. \quad \text{Отже, } k_e = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}.$$

Коефіцієнт трансформації ЕРС відрізняється від коефіцієнта трансформації трансформатора відношенням обмотувальних коефіцієнтів.

З 4.17 маємо $E_1 = k_e E_2 = E'_2$, де E'_2 – приведене до обмотки статора діюче значення ЕРС фази обмотки ротора.

Потік розсіювання Φ_{s1} індукує в кожній фазі обмотки статора ЕРС розсіювання

$$\dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_0 X_1,$$

де X_1 – індуктивний опір фази обмотки статора.

Крім того, кожна фаза обмотки статора має активний опір r_1 , що викликає падіння напруги $I_0 r_1$.

Отже, для однієї фази статора рівняння рівноваги ЕРС буде

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 X_1 \quad (4.18)$$

Відповідна даному рівнянню еквівалентна схема зображена на рисунку 4.10, а, а векторна діаграма асинхронного двигуна - на рисунку 4.10, б, які подібні до еквівалентної схеми і векторної діаграми трансформатора при х. х.

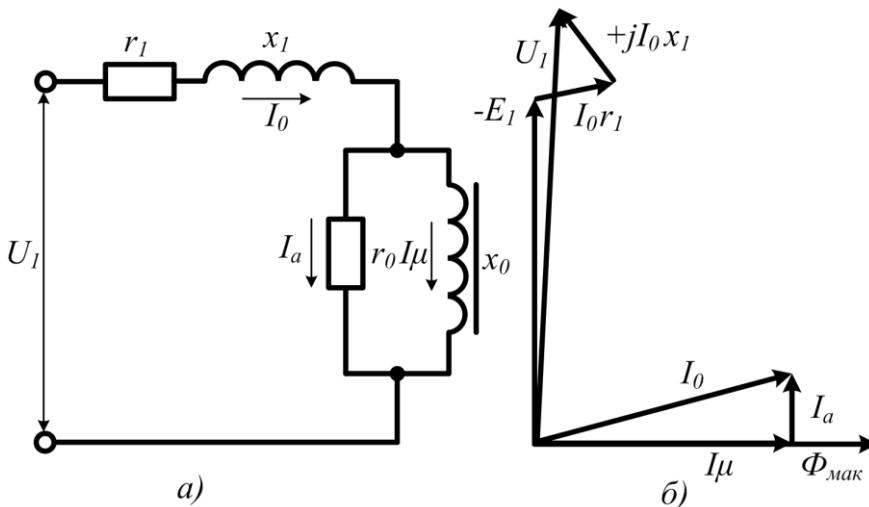


Рис. 4.10 – Еквівалентна схема а) та векторна діаграма б) асинхронної машини при х. х.

Струм х. х. I_0 має реактивну або намагнічуючу складову I_μ , що використовується для збудження магнітного поля, і активну складову I_a , яка необхідна для покриття втрат в сталі статора та ротора, а також в обмотці статора. Так як асинхронний двигун має повітряний зазор між статором і ротором, то його струм х. х. I_0 завжди значно більший, ніж у трансформатора тієї ж потужності, де магнітний потік замикається в основному через сталь. Тому якщо у трансформатора

середньої потужності струм $x. x.$ становить 5 – 10 %, то у асинхронного двигуна такої ж потужності він складе 20 - 35% номінального значення. Індуктивний X_1 й активний r_1 опір асинхронного двигуна також значно більший і, отже, падіння напруги $I_0 r_1$ і $I_0 X_1$, малі при $x.x.$ трансформатора, в асинхронних двигунах досягають декількох відсотків номінальної напруги. Але і тут основний магнітний потік $\Phi_{\text{мак}}$ і відповідно ЕРС E_1 мають основне значення, а тому приблизно можна вважати $E_1 \approx U_1$.

Струм холостого ходу та короткого замикання втрати

При загальмованому роторі і короткозамкнутій його обмотці асинхронний двигун подібний короткозамкнутому трансформатору з тією лише різницею, що струм к. з. $I_{\text{к.з}}$ двигуна перевищує номінальний струм $I_{\text{ном}}$ в 4–5 разів, тоді як у трансформаторі $I_{\text{к.з}} = (12-18)I_{\text{ном}}$. Проте двигун, так само як і трансформатор, довго не можна залишати під повною напругою при к. з., щоб уникнути надмірного нагрівання. Тому для визначення параметрів к. з. проводять дослід к. з.: до двигуна підводять таку понижену напругу, при якій $I_{\text{к.з}} = I_{\text{ном}}$.

Так як між асинхронним двигуном і трансформатором при к. з. існує повна подібність, то еквівалентна схема і векторна діаграма асинхронного двигуна не мають принципової відмінності від еквівалентної схеми і векторної діаграми трансформатора. Однак умови приведення ротора до кола статора асинхронної машини складніше, ніж у трансформаторі, так як ротор конструктивно може сильно відрізнятись від статора. Під приведеною обмоткою ротора розуміють таку обмотку, яка має ту ж кількість фаз і витків у фазі і те ж розташування обмотки, що і обмотка статора.

При дослідженні режиму к. з. асинхронного двигуна прикладена напруга значно менша номінальної, а струми, що виникають в обмотці ротора, створюють обертове магнітне поле, спрямоване зустрічно магнітному полю статора. Тому основний магнітний потік Φ малий і ним можна знехтувати. Тоді із умови рівноваги МРС $F_0 = m_1 k_{o\phi 1} W I_0$ статора та ротора отримаємо

$$m_1 k_{o\phi 1} W_1 I_1 = m_2 k_{o\phi 2} W_2 I_2,$$

де m_1 і m_2 – число фаз;

I_1 і I_2 – струми в фазах статора та ротора відповідно.

Коефіцієнт трансформації струмів

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 k_{o\delta 1} W_1}{m_2 k_{o\delta 2} W_2} \quad (4.19)$$

Наведений струм ротора $I'_2 = I_1 = \frac{I_2}{k_i}$.

При визначенні наведеного значення активного опору фази обмотки ротора будемо виходити з того, що втрати в обмотці ротора повинні залишитися незмінними $m_2 I_2^2 r_2 = m_1 (I'_2)^2 r'_2$, звідки

$$\begin{aligned} r'_2 &= r_2 \frac{m_2 I_2^2}{m_1 (I'_2)^2} = r_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_1 k_{o\delta 1} W_1}{m_2 k_{o\delta 2} W_2} \right)^2 = \\ &= r_2 \frac{k_{o\delta 1} W_1}{k_{o\delta 2} W_2} \cdot \frac{m_1 k_{o\delta 1} W_1}{m_2 k_{o\delta 2} W_2} = r_2 k_e k_i = r_2 k \end{aligned} \quad (4.20)$$

де $k = k_e k_i$ – коефіцієнт трансформації асинхронного двигуна.

При визначенні наведеного значення індуктивного опору фази обмотки ротора будемо виходити з того, що фазний кут між ЕРС і струмом в роторі має залишитися незмінним $\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{r_2} = \frac{X'_2}{r'_2}$,

звідки

$$X'_2 = \frac{r'_2 X_2}{r_2} = k_e k_i X_2 = k X_2 \quad (4.21)$$

За аналогією з трансформаторами параметри к. з. асинхронної машини (активний і індуктивний опір) будуть

$$r_\kappa = r_1 + r'_2; \quad X_\kappa = X_1 + X'_2 \quad (4.22)$$

де r_κ і X_κ – активний і індуктивний опір к. з. фази двигуна.

Потужність, що споживає двигун при к.з., практично витрачається на покриття втрат в обмотки статора та ротора

$$P_\kappa = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1^2 r_1 + m_1 (I'_2)^2 r'_2 = m_1 I_1^2 r_\kappa \quad (4.23)$$

Слід мати на увазі, що на відміну від трансформаторів параметри к. з. асинхронної машини r_κ і X_κ не завжди постійні.

Асинхронний двигун при обертанні ротора: частота струму, опори ротора, струм в роторі

Якщо до статора двигуна підвести номінальну напругу, то його коротко замкнутий або замкнутий фазний ротор обертатиметься вхолосту, якщо на валу двигуна немає навантаження.

Ротор обертається у бік обертання магнітного поля статора із швидкістю $n_2 < n_1$. Тому швидкість обертання магнітного поля статора відносно ротора дорівнює різниці швидкостей

$$n = n_1 - n_2 \quad (4.24)$$

Магнітний потік статора Φ_1 , обганяючи ротор зі швидкістю $n = n_1 - n_2$, індукуює в роторі ЕРС і струми частотою f_2 , яку називають частотою ковзання.

Частота ковзання f_2 може бути визначена з формули

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}$$

Помножимо чисельник і знаменник дробу на n_1

$$f_2 = \frac{pn_1(n_1 - n_2)}{60n_1} = sf_1 \quad (4.25)$$

Таким чином, частота ЕРС і струму, що індукуюється в роторі магнітним полем, що обертається, дорівнює частоті мережі, помноженій на ковзання.

У зв'язку із зміною частоти струму в роторі змінюються і всі залежні від частоти величини: ЕРС, індуктивний опір x_2 , струм.

Величина ЕРС в роторі, що обертається, E_{2s} складає

$$E_{2s} = 4,44K_{об2}f_2W_2\Phi_m$$

Підставляємо в цю формулу значення $f_2 = sf_1$

$$E_{2s} = 4,44K_{об2}W_2\Phi_m f_1s$$

Оскільки ЕРС нерухомого ротора складе

$$E_2 = 4,44K_{об2}W_2f_1\Phi_m$$

то

$$E_{2s} = sE_2 \quad (4.26)$$

тобто ЕРС, індукована у роторі E_{2s} , що обертається, рівна ЕРС нерухомого ротора E_2 , помноженій на ковзання s .

Індуктивний опір ротора, що обертається,

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2 = s x_2 \quad (4.27)$$

тобто індуктивний опір ротора x_{2s} , що обертається, дорівнює індуктивному опору нерухомого ротора x_2 , помноженому на ковзання s .

Активний опір ротора r_2 не залежить від частоти.

За законом Ома струм в роторі дорівнює

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{s E_2}{\sqrt{r_2^2 + s^2 x_2^2}}$$

Розділивши чисельник і знаменник правої частини рівняння на s , отримаємо

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} \quad (4.28)$$

З рівняння (4.28) видно, що сила струму в роторі, що обертається, залежить від ковзання.

У формулі (4.28) режим асинхронного двигуна з ротором, що обертається, приведений до еквівалентного режиму при нерухомому роторі, оскільки величини E_2 та x_2 , залежні від ковзання, відповідають нерухомому ротору. При цьому все відбувається так, як ніби ротор нерухомий і до його затисків підведена ЕРС E_2 , а його опори дорівнюють $\frac{r_2}{s}$ і x_2 .

Оскільки обмотка ротора трифазна і по ній протікає трифазний струм частотою f_2 , в роторі утворюється магнітне поле, що обертається відносно ротора зі швидкістю $n = n_1 - n_2$, відповідній частоті струму ротора, тобто

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}$$

Крім того, сам ротор обертається в просторі із швидкістю n_2 . Тому швидкість магнітного поля ротора, що обертається в просторі, дорівнює сумі швидкостей $n + n_2$.

З формули $f_2 = \frac{pn}{60}$ можна написати $n = \frac{60 f_2}{p}$.

Підставивши значення $f_2 = sf_1$, отримаємо

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

але оскільки $n_2 = n_1(1-s)$, то $n + n_2 = n_1 s + n_1(1-s) = n_1$

Отже, поле ротора обертається в просторі з такою ж швидкістю і в ту ж сторону, що і поле статора.

Так само, як і для трансформатора, для асинхронного двигуна можна накреслити діаграму його МРС, яка подібна до діаграми МРС трансформатора, з тією різницею, що вектори МРС в двигуні обертаються в просторі із швидкістю n_1 (рис. 4.11).

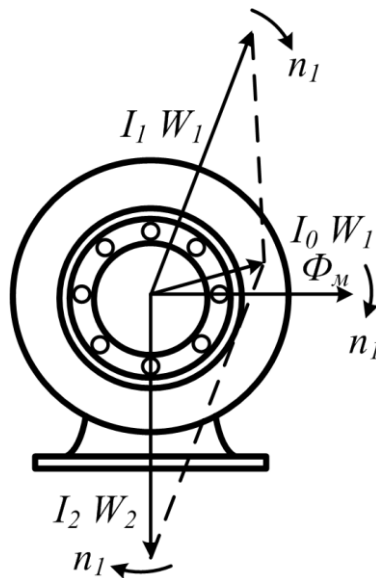


Рис. 4.11 – Векторна діаграма МРС асинхронного двигуна

Відповідно до рівняння МРС для трансформатора результуюча МРС асинхронного двигуна $I_0 \omega_1$ і створюваний нею результуючий магнітний потік Φ_m будуть постійними при будь-якому навантаженні і постійній напрузі і частоті мережі.

Магнітні потоки та рівняння ЕРС при навантаженні

Крім основного (головного) магнітного потоку Φ , який зв'язується з обмотками статора та ротора (рис. 4.12), в асинхронній машині є ще два магнітних потоки, що називаються потоками розсіювання: магнітний потік розсіювання статора і магнітний потік розсіювання ротора $\Phi_{\sigma 2}$. Кожен з цих потоків розсіювання зв'язується лише з власною обмоткою і наводить в ній ЕРС розсіювання: у обмотці статора $E_{\sigma 1}$, в обмотці ротора $E_{\sigma 2}$.

Наявність магнітних потоків розсіювання обумовлює індуктивності розсіювання в обмотці статора $L_{\sigma 1}$ і в обмотці ротора $L_{\sigma 2}$, а отже, і індуктивні опори, що називаються індуктивними опорами розсіювання: $x_1 = W_1 L_{\sigma 1}$ – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; $x_2 = W_2 L_{\sigma 2}$ – індуктивний опір розсіювання обмотки ротора. Тут W_1 і W_2 – кутові частоти струмів в обмотки статора та ротора.

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора

$$x_1 = \frac{1,58 \cdot 10^{-8} f l_{i1} W_1^2 \lambda_1}{p q_1}, \quad (4.29)$$

де

$$\lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\lambda 1} \quad (4.30)$$

- коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки статора; $\lambda_{n1}, \lambda_{\sigma 1}, \lambda_{\lambda 1}$ – коефіцієнти магнітної провідності пазів, диференціального і лобового розсіювання статора.

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора визначається виразами, які залежать від типу обмотки ротора. Для короткозамкнутої обмотки при нерухомому роторі

$$x_2 = 7,9 \cdot 10^{-9} f l_{i2} \lambda_2, \quad (4.31)$$

де

$$\lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{\sigma 2} + \lambda_{\kappa 2} + \lambda_{\sigma \kappa} \quad (4.32)$$

- коефіцієнт магнітної провідності розсіювання короткозамкнутої обмотки ротора; $\lambda_{n2}, \lambda_{\sigma 2}, \lambda_{\kappa 2}$ і $\lambda_{\sigma \kappa}$ – коефіцієнти магнітної провідності розсіювання пазів, диференціального, короткозамикаючих кілець і скошу пазів короткозамкнутого ротора.

Якщо ж ротор фазний і його обмотка виконана за типом обмотки статора, то індуктивний опір (Ом) розсіювання цієї обмотки $x_{2\phi}$ при нерухомому роторі ($s = 1$) визначається виразом, аналогічним (4.29)

$$x_2 = \frac{1,58 \cdot 10^{-8} f_1 l_{i2} W_2^2 \lambda_{2\phi}}{pq_2}, \quad (4.33)$$

де

$$\lambda_{2\phi} = \lambda_{n2} + \lambda_{o2} + \lambda_{r2} \quad (4.34)$$

У виразах (4.29) і (4.33) розрахункова довжина сердечників статора l_{i1} і ротора l_{i2} – в міліметрах.

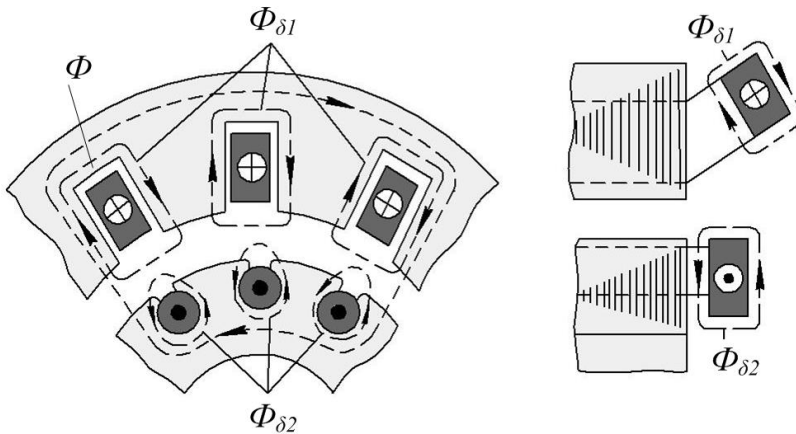


Рис. 4.12 – Магнітні потоки розсіювання асинхронної машини

Для розрахунку коефіцієнтів магнітної провідності користуються виразами, що приводяться в керівництві з розрахунку електричних машин.

Приведення робочого процесу асинхронної машини до робочого процесу трансформатора

Приведемо вторинну обмотку асинхронної машини до первинної. Для цього можна уявити собі, що реальна вторинна обмотка замінюється приведеною, яка складається так, як і первинна

обмотка, і має з нею однакову кількість фаз і витків у фазі, а також однаковий обмоточний коефіцієнт основної гармоніки.

Приведені величини позначимо штрихами. Приведені напруги і струми вторинної обмотки повинні бути розраховані так, щоб енергетичні і основні електромагнітні співвідношення в машині не порушувались.

В загальному випадку необхідно мати на увазі, що пази ротора і статора асинхронної машини можуть бути скошені відносно один одного. Зазвичай в асинхронних машинах скошені пази ротора, а пази статора є прямими. Тому при приведенні обмотки ротора до обмотки статора необхідно уявити собі, що приведена обмотка ротора також має прямі пази. Таким чином, в приведеній машині основні гармоніки полів статора і ротора і їх результуючого поля будуть орієнтовані вдовж прямих пазів, в осьовому напрямку, тобто ці поля будуть скошені в тангенційному напрямку. Тому співвідношення між неприведеними і приведеними величинами доцільно встановити, виходячи із нескошеного магнітного поля. Для ясності допустимо, що вираз для обмотки коефіцієнтів статора $k_{o\delta 1}$ і ротора $k_{o\delta 2}$ має в якості співмножників тільки коефіцієнти скорочення і розподілення обмотки, а вплив скосу k_c вводимо в якості додаткового множника.

Нескошене магнітне поле основної гармоніки з потоком величини Φ індукуює в обмотці нерухомого ротора зі скошеними пазами ЕРС

$$E_2 = \pi \sqrt{2} f_1 W_2 k_{o\delta 2} k_c \Phi \quad (4.35)$$

А в приведеній обмотці ротора і в обмотці статора – однакові за величиною ЕРС

$$E'_2 = E_1 = \pi \sqrt{2} f_1 W_1 k_{o\delta 2} \Phi \quad (4.36)$$

Назвемо коефіцієнтом трансформації або коефіцієнтом приведення ЕРС і напруг k_u відношення

$$k_u = \frac{E'_2}{E_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (4.37)$$

Згідно з виразом 4.23 і 4.24

$$k_u = \frac{W_1 k_{o\delta 1}}{W_2 k_{o\delta 2}} \cdot \frac{1}{k_c} \quad (4.38)$$

Приведена обмотка ротора з приведеним струмом I'_2 створює основну гармоніку н.с., яка орієнтована в осьовому напрямку і має амплітуду

$$F'_2 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_1 k_{o\delta 1}}{p} I'_2$$

Неприведена обмотка ротора створює основну гармоніку н. с., яка орієнтована впродовж скошених пазів ротора і має амплітуду

$$F_2 = \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W_2 k_{o\delta 2}}{p} I_2$$

Цей вираз не має коефіцієнта k_c . Однак при розрахунку потокозчеплення взаємної індукції з обмоткою статора, що створюється н.с. F_2 , необхідно враховувати коефіцієнт скосу k_c , так як н.с. F_2 і створюваний нею потік скошені відносно обмотки статора. Тому відносно статора ефективним є н.с. $k_c F_2$ і при приведенні повинна бути рівність

$$F'_2 = k_c F_2$$

Виходячи з даної рівності і використовуючи написані раніше вирази для F'_2 і F_2 , знайдемо для коефіцієнта трансформації, або приведення струмів,

$$k_1 = \frac{I_2}{I'_2} \quad (4.39)$$

наступний вираз

$$k_1 = \frac{m_1 W_1 k_{o\delta 1}}{m_2 W_2 k_{o\delta 2}} \cdot \frac{1}{k_c} \quad (4.40)$$

Для короткозамкненої обмотки у вигляді білячої клітки $m_2 = Z_2$, $W_2 = \frac{1}{2}$, $k_{o\delta 2} = 1$ та I_2 – це струм стрижня.

Коефіцієнти трансформації k_u і k_1 при $m_1 \neq m_2$ не рівні, так як при заданому струмі I намагнічувальна дія і н.с. обмотки залежать від кількості фаз m . При приведенні вторинна обмотка з числом фаз m_2 замінюється обмоткою з числом фаз m_1 . На відміну від трансформатора для асинхронної машини у вираз для k_u і k_1 входять також обмотувальні коефіцієнти.

За відсутності взаємного скосу пазів в нерівностях 4.38 і 4.40 необхідно прийняти $k_c = 1$.

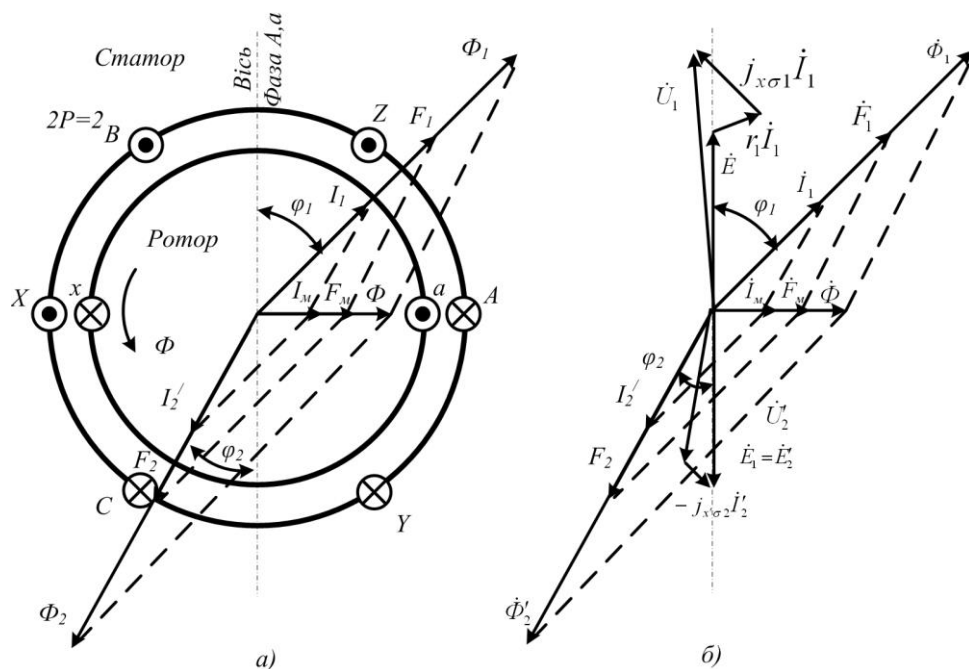


Рис. 4.13 – Просторова (а) і тимчасова (б) векторні діаграми асинхронної машини з загальмованим ротором при співпаданні осі фаз статора і ротора

Основні векторні рівняння обмоток ротора і статора та векторні діаграми

Режим асинхронного двигуна з ротором, що обертається, приведений до еквівалентного режиму при нерухомому роторі, на підставі векторної діаграми МРС асинхронного двигуна можна накреслити векторну діаграму приведенного асинхронного двигуна при навантаженні (рис. 4.14).

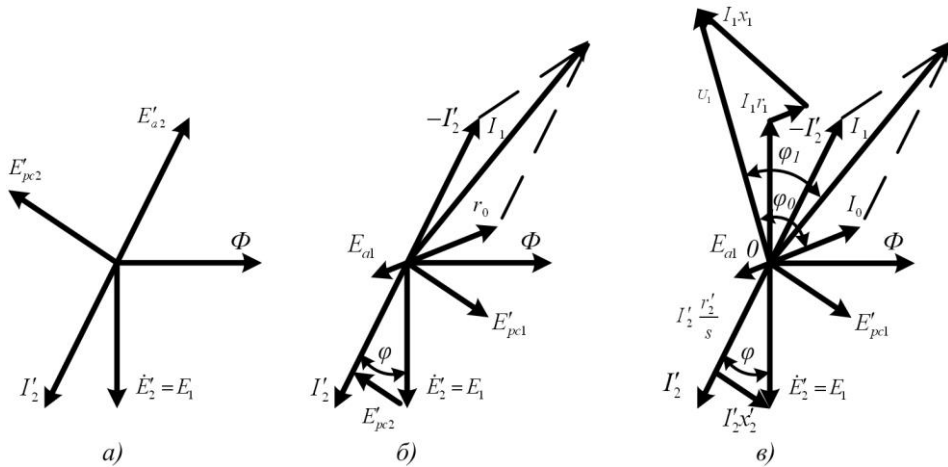


Рис. 4.14 – Векторна діаграма асинхронного двигуна при навантаженні: а) – зворотні ЕРС в обмотці ротора, б) – зворотні ЕРС в двигуні, в) – повна діаграма

Оскільки обмотка ротора при роботі асинхронного двигуна замкнута накоротко, то напруга на затискачах ротора дорівнює нулю. $U'_2 = 0$. ЕРС E'_2 , що індукується в роторі, повністю врівноважується зворотною ЕРС розсіяння E'_{pc2} . ЕРС E'_{pc2} індукується магнітним потоком розсіяння Φ_{pc2} , що створюється струмом ротора I'_2 і зворотною ЕРС активного опору E'_{a2} , яка наводиться струмом ротора I'_2 в активному опорі обмотки ротора $\frac{r'_2}{s}$.

На рисунку 4.14, а зображені зворотні ЕРС у вторинній обмотці, а на рисунку 4.14, б – зворотні ЕРС в первинній обмотці і показано, що сума всіх ЕРС в обмотці ротора дорівнює нулю.

Векторна діаграма для первинної обмотки двигуна не відрізняється від відповідної векторної діаграми трансформатора.

Оскільки $E'_{pc2} = I'_2 x'_2$, а $E'_{a2} = I'_2 \frac{r'_2}{s}$, то на векторній діаграмі асинхронного двигуна вектор ЕРС обмотки ротора E'_2 зображують таким, що складається з двох складових, кожна з яких врівноважує відповідну зворотню ЕРС. Падіння напруги на активному опорі $I'_2 \frac{r'_2}{s}$

врівноважує зворотну ЕРС активного опору E'_{a2} , а падіння напруги на індуктивному опорі $I'_2 x'_2$ врівноважує ЕРС розсіяння E'_{pc2} .

$$\bar{E}'_2 + \bar{I}'_2 x'_2 + \bar{I}'_2 \frac{r'_2}{s} = 0 \quad (4.41)$$

Так само і в трансформаторі

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 x_1 + \bar{I}_1 r_1 \quad (4.42)$$

Повна векторна діаграма асинхронного двигуна представлена на рисунку 4.14, в.

На цій діаграмі кут φ_1 між векторами напруги U_1 і струму двигуна I_1 при навантаженні значно менше кута φ_0 між відповідними векторами при холостому ході, а отже, $\cos \varphi_1$ значно вище $\cos \varphi_0$. Звідси витікає, що незавантажені асинхронні двигуни значно погіршують коефіцієнт потужності в мережі, тому потрібно уникати роботи асинхронних двигунів вхолосту або неповного їх завантаження.

На підставі векторної діаграми, рівнянь струму і ЕРС (4.41), (4.42) можна побудувати схему заміщення асинхронного двигуна аналогічно схемі заміщення трансформатора.

На схемі заміщення електромагнітний зв'язок між обмотками статора і ротора замінений електричним – введенням контура, що намагнічує, з опорами r_0 і x_0 (рис. 4.15). Опір $\frac{r'_2}{s}$, величина якого залежить від ковзання, є єдиним змінним параметром в схемі, від якого залежить робота двигуна при зміні навантаження.

Наприклад, при холостому ході двигуна ковзання $s \approx 0$, а $\frac{r'_2}{s} \approx \infty$. Те ж саме спостерігається при розімкненому роторі, тоді $I'_2 = 0$.

При роботі двигуна на навантаження величини струму I_1 і I'_2 залежать від навантаження. При збільшенні навантаження ковзання s збільшується, внаслідок чого $\frac{r'_2}{s}$ зменшується, струм I'_2 збільшується, що викликає відповідне збільшення струму статора I_1 .

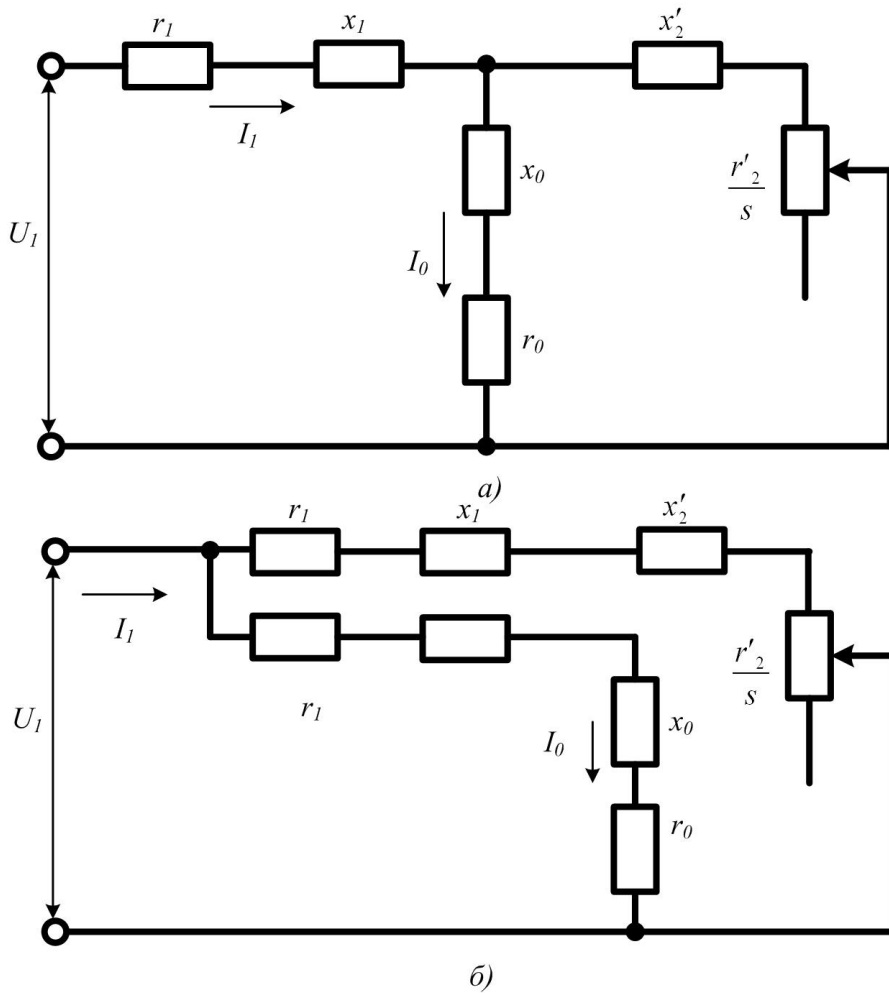


Рис. 4.15 – Схеми заміщення асинхронних двигунів:
а) – Т-подібна; б) – спрощена Г-подібна

Справжню схему заміщення (рис. 4.15, а) називають Т-подібною, складається вона з трьох кіл і є складною. Її можна спростити шляхом винесення контура, що намагнічує, на затискачі двигуна. Тоді виходить простіша, Г-подібна схема заміщення, що складається лише з двох кіл: що намагнічуються струмом I_0 робочим і струмом I'_2 . Обидва кола незалежні одне від одного, оскільки вони обидва включені паралельно на напругу мережі U_1 (рис. 4.15, б).

Щоб при винесенні контура, що намагнічує, на затискачі двигуна величина струму I_0 не змінилася, в контур, що намагнічує, включають

послідовно опори r_1 і x_1 . При цьому дозволяється незначна похибка, яка істотного на результати дослідження двигуна не впливає.

На підставі спрощеної схеми заміщення можна визначити величину струму в робочому контурі

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (4.43)$$

4.3 ОБЕРТАЛЬНИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Електрична потужність, підведена до двигуна з мережі, перетворюється в ньому в механічну, що відбирається з вала машини.

Перетворення енергії супроводжується втратами.

Наочне уявлення про розподіл підведеної до двигуна потужності дає енергетична діаграма (рис. 4.16).

До асинхронного двигуна з мережі підводиться потужність, Вт

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 \quad (4.44)$$

Частина цієї потужності витрачається на втрати в сталі машини – $P_{ст}$ і на втрати в міді статора, тобто на нагрів обмотки статора

$$P_{м.ст} = 3I_{1\phi}^2 r_1 \quad (4.45)$$

Остання потужність електромагнітним шляхом передається на ротор і називається електромагнітною потужністю $P_{ем}$.

Частина потужності, що передається на ротор, витрачається на нагрів міді обмоток ротора

$$P_{м.рот} = 3I_{2\phi}^2 r_1 \quad (4.46)$$

Остання частина потужності називається повною механічною потужністю $P_{мех}$.

Якщо з повної механічної потужності відняти механічні втрати $P_{мех}$ і додаткові втрати $P_{доод}$, то отримаємо корисну потужність на валу

двигуна P_2 . Цю величину потужності в кіловатах позначають на заводському щитку двигуна.

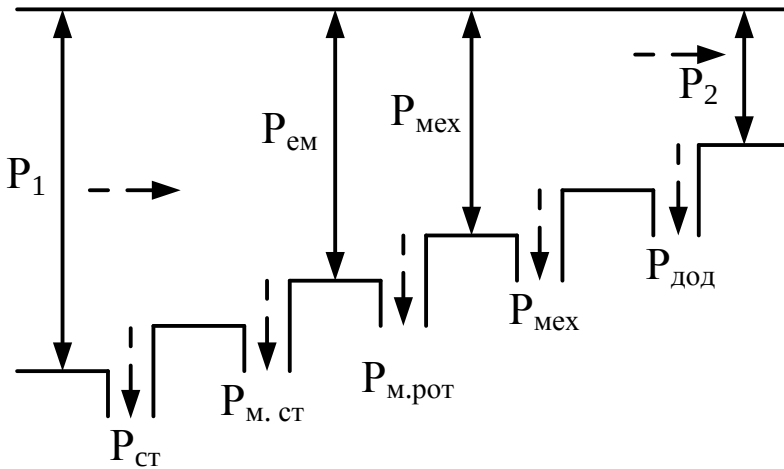


Рис.4.16 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Для того, щоб отримати величину потужності P_1 , що споживається двигуном з мережі, необхідно корисну потужність P_2 розділити на к. к. д. двигуна

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad (4.47)$$

К. к. д. асинхронного двигуна можна визначити з формули

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1}, \quad (4.48)$$

де P_1 – підведена до двигуна потужність 4.44;

$$\sum P = P_{ст} + P_{м.ст} + P_{м.рот} + P_{мех} + P_{дод} \quad (4.49)$$

Величина к. к. д. асинхронних двигунів знаходиться в межах від 0,7 до 0,9 і вище, причому для потужніших двигунів ця цифра вища.

Як видно з енергетичної діаграми, різниця між електромагнітною потужністю $P_{ем}$ і повною механічною потужністю ротора $P_{мех}$ дорівнює втратам в міді ротора

$$P_{м.рот} = P_{ем} - P_{мех}$$

Але механічна потужність ротора

$$P_{\text{мех}} = MW_2 = M \frac{2\pi n_2}{60}, \quad (4.50)$$

де M – момент двигуна, що обертає, Н·м;

n_2 – число оборотів ротора, об/хв.

Електромагнітна потужність магнітного поля $P_{\text{ем}}$, що обертається, дорівнює

$$P_{\text{ем}} = MW_1 = M \frac{2\pi n_1}{60}, \quad (4.51)$$

де n_1 – число оборотів магнітного кола статора за хвилину.

Але так як $n_2 = n_1(1-s)$, то

$$P_{\text{м.рот}} = P_{\text{ем}} - M \frac{2\pi n_1(1-s)}{60}$$

Так як

$$P_{\text{ем}} = M \frac{2\pi n_1}{60},$$

то

$$P_{\text{м.рот}} = P_{\text{ем}} - P_{\text{ем}}(1-s) = P_{\text{ом}} - P_{\text{ем}} + P_{\text{ем}}s = sP_{\text{ем}}, \quad (4.52)$$

тобто електричні втрати в роторі пропорційні ковзанню.

Рівняння обертового моменту асинхронного двигуна

Момент, що обертається, можна виразити через втрати в міді ротора. Оскільки

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{W_1},$$

де $W_1 = \frac{2\pi f_1}{60}$, а так як

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

то

$$W_1 = \frac{2\pi 60 f_1}{60 p} = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (4.53)$$

Замість $P_{\text{ем}}$ підставимо його значення з формули 4.52

$$P_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{м.рот}}}{s}$$

Тоді

$$M = \frac{P_{em}}{W_1} = \frac{P_{м.ром}}{iW_1} = \frac{mI_2'^2 r_2}{W_1 s}, \quad (4.54)$$

тобто обертальний момент асинхронного двигуна пропорційний втратам в міді ротора.

Оскільки при приведенні вторинних величин до первинної обмотки втрати в міді не змінюються, то у формулу 4.54 можна підставити приведені величини

$$M = \frac{m(I_2')^2 \frac{r_2'}{s}}{W_1}. \quad (4.55)$$

Підставивши у формулу 4.54 значення струму I_2' з формули 4.43 і значення W_1 з формули 4.53, отримаємо

$$M = \frac{mpU_{1\phi}^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_1')^2 \right]}, \quad (4.56)$$

де $U_{1\phi}$ – фазна напруга обмотки статора, а інші величини нам відомі.

З цієї формули потрібно зробити основний висновок: момент асинхронного двигуна, що обертається, пропорційний квадрату напруги мережі, що підводиться до статора,

$$M \equiv U_{1\phi}^2,$$

тобто асинхронні двигуни чутливі до коливань напруги в мережі.

Як видно з векторної діаграми асинхронного двигуна (рис.4.14, в)

$$I_2' \frac{r_2'}{s} = E_2' \cos \psi_2,$$

де ψ_2 – кут зрушення між векторами E_2' і I_2' .

Підставивши цей вираз у формулу 4.55, отримаємо

$$M = \frac{mI_2'}{W_1} E_2' \cos \psi_2$$

Оскільки $E'_2 = E_1$, підставимо в цю формулу значення E_1 , отримаємо

$$M = \frac{mI'_2}{W_1} 4,44K_{об1} f_1 W_1 \Phi_m \cos \psi_2 \quad (4.57)$$

Оскільки величини

$$C_m = \frac{m4,44K_{об1}}{\omega_1} f_1 \omega_1 \quad (4.58)$$

для даного двигуна є постійними, тобто

$$C_m = const,$$

то формулу моменту можна написати так

$$M = C_m \Phi_m I'_2 \cos \psi_2, \quad (4.59)$$

тобто момент двигуна, що обертає, залежить від результуючого магнітного потоку двигуна і від величини активного струму ротора.

Ця формула ідентична формулі моменту двигуна постійного струму.

Підставляючи у формулу 4.56 різні значення струму s , при різному навантаженні двигуна можна побудувати криву залежності моменту, що обертає, від ковзання, при постійній напрузі і частоті мережі (рис. 4.17).

При ковзанні $s=1$, коли $n_2=0$, двигун розвиває пусковий момент M_n . По мірі розгону двигуна ковзання зменшується, а момент двигуна, що обертається, збільшується. При пуску двигуна в хід, коли $s=1$, частота струму в роторі $f_2 = f_1 = 50$ Гц індуктивний опір x_2 ротора має максимальне значення, кут ψ_2 між векторами струму і ЕРС найбільший, а $\cos \psi_2$ найменший, тому і момент, що обертається, при пуску найбільший, що видно з рівняння моменту 4.59.

При розгоні двигуна частота струму в роторі $f_2 = sf_1$ зменшується, унаслідок чого знижується його індуктивний опір, що приводить до зменшення кута ψ_2 , і збільшення моменту, що обертається.

Максимальне ковзання, що відповідає максимальному значенню обертового моменту $M_{\max}$ визначається за формулою

$$S_{\max} = \frac{r'_2}{x_1 + x'_2} = \frac{r'_2}{x_k} \quad (4.60)$$

Формулу максимального ковзання отримуємо шляхом дослідження рівняння моменту 4.56 на максимум, для чого беремо похідну $\frac{dM}{ds}$ цього рівняння і прирівнюємо її до нуля.

Область стійкої роботи двигуна показана на ділянці кривої OA , коли із зростанням навантаження ковзання збільшується. На цій ділянці кривої і знаходиться точка, відповідна номінальному моменту двигуна M_n . З кривої видно, що в межах номінальної потужності момент двигуна, що обертається, пропорційний ковзанню. Зазвичай в асинхронних двигунів номінальний момент M_n розвивається при ковзанні, рівному 3–5%. Найбільший момент, що розвивається двигуном, називається максимальним моментом $M_{\max}$.

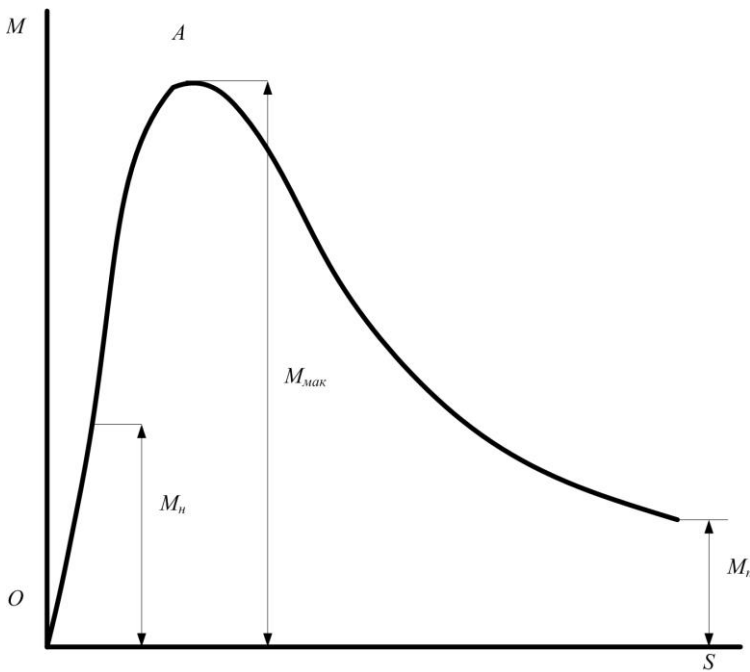


Рис. 4.17 – Залежність обертового моменту асинхронного короткозамкненого двигуна від ковзання

Перевантаження двигуна моментом опору робочої машини, рівний максимальному, приводить до зупинки двигуна. Відношення $\frac{M_{\max}}{M_n}$ характеризує перевантажувальну здатність двигуна.

Для асинхронних трифазних двигунів потужністю до 100 Квт $\frac{M_{\text{мак}}}{M_n} \geq 1,7 - 2,2$; причому більша цифра відноситься до

двигунів з вищими швидкостями обертання. Відношення $\frac{M_n}{M_n}$

характеризує пускові властивості двигуна, $\frac{M_n}{M_n} \geq 1,0 - 2,0$, для двигунів

меншої потужності це відношення більше.

Якщо в рівняння моменту 4.56 підставити значення максимального ковзання 4.60, то вийде рівняння максимального моменту двигуна

$$M_{\text{мак}} = \frac{pmU_1^2}{2\pi f 2[r' + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)}]} \quad (4.61)$$

З цього рівняння видно, що величина максимального моменту двигуна не залежить від величини активного опору кола ротора r'_2 , оскільки ця величина у формулу 4.61 не входить, але від величини опору в колі ротора r'_2 залежить максимальне ковзання, тобто та величина ковзання, при якій двигун розвиватиме максимальний момент.

Це питання має особливе значення для двигунів з фазним ротором.

Необхідно добиватися такого положення, щоб при пуску двигун розвивав максимальний момент, а ковзання в початковий момент пуску дорівнювало одиниці. Підставивши це значення ковзання у формулу 4.60, отримаємо

$$1 = \frac{r'_2}{x_{\hat{e}}}; \quad r'_2 = x_{\hat{e}}, \quad (4.62)$$

тобто максимальний обертальний момент при пуску асинхронного двигуна розвивається за умови, що $r'_2 = x_{\hat{e}}$, коли приведений активний опір кола ротора дорівнює загальному індуктивному опору приведенного двигуна.

Під r'_2 розуміють опір обмотки ротора і пускового реостата в колі ротора

$$r'_2 = r'_{\text{рот}} + r'_{\text{реост}} \quad (4.63)$$

Зазвичай $r_{\text{рeост}}$ на одну фазу беруть в 8–10 разів більше опору однієї фази ротора, тобто

$$r'_{\text{рeост}} = (8 - 10)r_{\text{рот}}$$

Момент асинхронного двигуна, що обертається, можна також визначити за формулою, як і для двигуна постійного струму

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2}$$

Залежність обертового моменту від ковзання, напруги, активної складової струму ротора

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

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{W_1}, \quad (4.64)$$

де

$$W_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (4.65)$$

кутова синхронна швидкість обертання.

Підставивши (4.64) значення електромагнітної потужності, отримаємо

$$M = \frac{P_{e2}}{W_1 s} = \frac{m_1 (I'_2)^2 r'_2}{W_1 s}, \quad (4.66)$$

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

Відповідно отримаємо формулу електромагнітного моменту асинхронної машини

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r'_2 p}{2\pi f_1 s \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]} \quad (4.67)$$

Параметри схеми заміщення асинхронної машини, r_1 , r'_2 , x_1 і x'_2 , що входять у вираз (4.67), є постійним U , так як їх значення при змінах навантаження машини залишається практично незмінним. Також

постійними можна вважати напругу на обмотці фази статора U_1 і f_1 частоту. У виразі моменту M єдина змінна величина – ковзання s , яке для різних режимів роботи асинхронної машини може приймати різні значення в діапазоні від $+\infty$ до $-\infty$ (рис. 4.9).

Розглянемо залежність від моменту 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 виразу (4.67), що є аналітичним виразом механічної характеристики $M = f(s)$, показує, що при значеннях ковзання $s = 0$ і $s = \infty$ електромагнітний момент $M = 0$. З цього випливає, що механічна характеристика $M = f(s)$ має максимум.

Для визначення величини критичного ковзання $s_{кр}$, відповідного максимального моменту, необхідно взяти першу похідну від 4.67 і прирівняти її до нуля: $\frac{dM}{ds} = 0$. В результаті

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (4.68)$$

Підставивши значення критичного ковзання (за 4.68) у вираз електромагнітного моменту (4.67), після ряду перетворень отримаємо вираз максимального моменту

$$M_{\text{макс}} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]} \quad (4.69)$$

У 4.68 і 4.69 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, нехтуючи величиною r_1 , отримаємо спрощені вираження критичного ковзання

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \quad (4.70)$$

і максимального моменту

$$M_{\text{макс}} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 (x_1 + x_2')} \quad (4.71)$$

Аналіз виразу 4.70 показує, що максимальний момент асинхронної машини у генераторному режимі більше, ніж у двигунному ($M_{\text{макс}г} > M_{\text{макс}д}$). На рис 4.18, а показана механічна характеристика асинхронної машини $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$. На цій характеристиці вказані зони, відповідні різним режимам роботи: двигунний режим ($0 < s \leq 1$), коли електромагнітний момент M є обертальним; генераторний режим ($-\infty < s \leq 0$) і гальмівний режим противключення ($1 < s \leq +\infty$), коли електромагнітний момент M є гальмуючим.

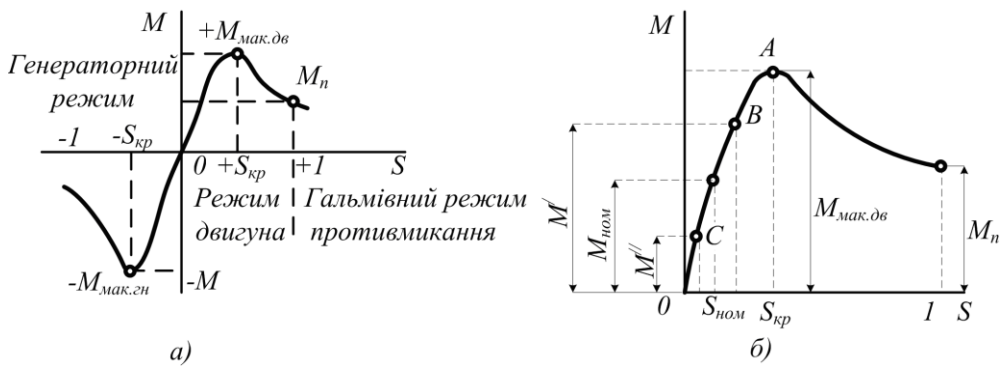


Рис. 4.18 – Залежність режимів роботи машини від ковзання

З (4.67) випливає, що електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги мережі: $M \equiv U_1^2$. Це значною мірою впливає на експлуатаційні властивості двигуна: навіть невелике зниження напруги мережі викликає помітне зменшення обертового моменту асинхронного двигуна. Наприклад, при зменшенні напруги мережі на 10% від номінального ($U_1 = 0,9U_{1\text{ном}}$) електромагнітний момент двигуна зменшується на 19 %: $M' = 0,9^2 M = 0,81M$, де M – момент при номінальній напрузі мережі, а M' – момент при зниженій напрузі.

Для аналізу роботи асинхронного двигуна зручніше скористатися механічною характеристикою $M = f(s)$, представленою на рис. 4.18, б. При включенні двигуна в мережу магнітне поле статора,

не володіючи інерцією, відразу ж починає обертання з синхронною частотою n_1 , в той же час ротор двигуна під впливом сил інерції в початковий момент пуску залишається нерухомим ($n_2 = 0$) і ковзання $s = 1$.

Підставивши (4.67) ковзання $s = 1$, отримаємо вираз пускового моменту асинхронного двигуна

$$M = \frac{m_p U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2]} \quad (4.72)$$

Під дією цього моменту починається обертання ротора двигуна, при цьому ковзання зменшується, а обертовий момент зростає відповідно з характеристикою $M = f(s)$. При критичному ковзанні $s_{кр}$ момент досягає максимального значення $M_{макс}$. З подальшим зростанням частоти обертання (зменшенням ковзання) момент M починає спадати, поки не досягне встановленого значення, що дорівнює сумі протидіючих моментів, прикладених до ротора двигуна: моменту x . x . M_0 та корисного навантаження моменту (моменту на валу двигуна) M_2 , тобто

$$M = M_0 + M_2 = M_{ст}. \quad (4.73)$$

Слід мати на увазі, що при ковзаннях, близьких до одиниці (пусковий режим двигуна), параметри схеми заміщення асинхронного двигуна помітно змінюють свої значення. Пояснюється це в основному двома факторами: посиленням насичення магнітних зубцевих шарів статора та ротора, що веде до зменшення індуктивних опорів розсіювання x_1 і x_2 , і ефектом витіснення струму в стрижнях ротора, що веде до збільшення активного опору обмотки ротора r_2' . Тому параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, що використовуються при розрахунку електромагнітного моменту по 4.67, 4.69 і 4.71 не можуть бути використані для розрахунку пускового моменту за 4.72.

Статичний момент $M_{ст}$ дорівнює сумі протидіючих моментів при рівномірному обертанні ротора ($n_2 = const$). Припустимо, що протидіючий момент на валу двигуна M_2 відповідає номінальному навантаженню двигуна. У цьому випадку сталий режим роботи двигуна визначиться точкою на механічній характеристиці з

координатами $M = M_{ном}$ і $s = s_{ном}$, де $M_{ном}$ і $s_{ном}$ – номінальні значення електромагнітного моменту і ковзання.

З аналізу механічної характеристики також випливає, що стабільна 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 в номінальному режимі ($M_{ном}; s_{ном}$), то мала місце рівність моментів: $M_{ном} = M_o + M_2$. Якщо відбулося збільшення навантаження моменту M_2 до значення M'_2 , то рівність моментів порушиться, тобто $M_{ном} < M_o + M'_2$, і частота обертання ротора почне зменшуватися (ковзання буде збільшуватися). Це призведе до зростання електромагнітного моменту до значення $M' = M_o + M'_2$ (точка В), після чого режим роботи двигуна знову стане сталим. Якщо ж при роботі двигуна в номінальному режимі відбудеться зменшення навантаження моменту до значення M''_2 , то рівність моментів знову порушиться, але тепер обертальний момент виявиться більше суми протидіючих: $M_{ном} > M_o + M''_2$. Частота обертання ротора почне зростати (ковзання буде зменшуватися), і це призведе до зменшення електромагнітного моменту M до значення $M'' = M_o + M''_2$ (точка С); стійкий режим роботи буде знову відновлено, але вже при інших значеннях M і s .

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

Таким чином, при досягненні електромагнітним моментом максимального значення настає межа стійкої роботи асинхронного двигуна. Отже, для стійкої роботи двигуна необхідно, щоб сума навантажувальних моментів, діючих на ротор, була менше максимального моменту: $M_{ст} = M_o + M_2 < M_{мак}$. Але щоб робота асинхронного двигуна була надійною і щоб випадкові короточасні перевантаження не викликали зупинки двигуна, необхідно, щоб він

мав перевантажувальну здатність. Перевантажувальна здатність двигуна λ визначається відношенням максимального моменту $M_{\text{мак}}$ до номінального $M_{\text{ном}}$. Для асинхронних двигунів загального призначення перевантажувальна здатність становить $\lambda = \frac{M_{\text{мак}}}{M_{\text{н}}} = 1,7 - 2,5$.

Слід також звернути увагу на те, що робота двигуна при ковзанні $s < s_{\text{кр}}$, тобто на робочій ділянці механічної характеристики, є найбільш економічною, так як вона відповідає малим значенням ковзання, а отже, і меншим значенням електричних втрат в обмотці ротора $P_{\text{e2}} = sP_{\text{ем}}$.

Механічна характеристика асинхронного двигуна

Електромагнітний момент асинхронного двигуна, а також його максимальне і пускове значення пропорційні квадрату напруги, що підводиться до обмотки статора $M \equiv U_1^2$. Водночас значення критичного ковзання не залежить від напруги U_1 . Це дає нам можливість побудувати механічні характеристики $M = f(s)$ для різних значень напруги U_1 (рис. 4.19), з яких випливає, що коливання напруги мережі U_1 щодо його номінального значення $U_{1\text{ном}}$ супроводжуються не тільки змінами максимального і пускового моментів, але і змінами частоти обертання ротора. Зі зменшенням напруги мережі частота обертання ротора знижується (ковзання збільшується). Напруга U_1 впливає на значення максимального моменту $M_{\text{мак}}$, а також на перевантажувальну здатність двигуна $\lambda = M_{\text{мак}} / M_{\text{ном}}$. Так, якщо напруга U_1 знизилася на 30 %, тобто $U_1 = 0,7U_{1\text{ном}}$, то максимальний момент двигуна зменшиться більш ніж удвічі: $M'_{\text{мак}} = 0,7^2 M_{\text{мак}} = 0,49M_{\text{мак}}$. На скільки зменшиться перевантажувальна здатність двигуна? Якщо, наприклад, при номінальній напрузі мережі перевантажувальна здатність $\lambda = M_{\text{мак}} / M_{\text{ном}} = 2$, то при зниженні напруги на 30 % перевантажувальна здатність двигуна $\lambda' = M'_{\text{мак}} / M_{\text{ном}} = 0,49 M_{\text{мак}} / M_{\text{ном}} = 0,49 \cdot 2 = 0,98$, тобто двигун не в змозі нести навіть номінальне навантаження.

Значення максимального моменту двигуна не залежить від активного опору ротора r'_2 . Що ж стосується критичного ковзання $s_{\text{кр}}$,

воно пропорційно опорі r'_2 . Таким чином, якщо в асинхронному двигуні поступово збільшувати активний опір кола ротора, то значення максимального моменту буде залишатися незмінним, а критичне ковзання буде збільшуватися (рис. 4.20). При цьому пусковий момент двигуна M_n зростає із збільшенням опорі r'_2 до деякого значення. На рисунку це відповідає опорі $r'_{2ш}$, при якому пусковий момент максимальний. При подальшому збільшенні опорі r'_2 пусковий момент зменшується.

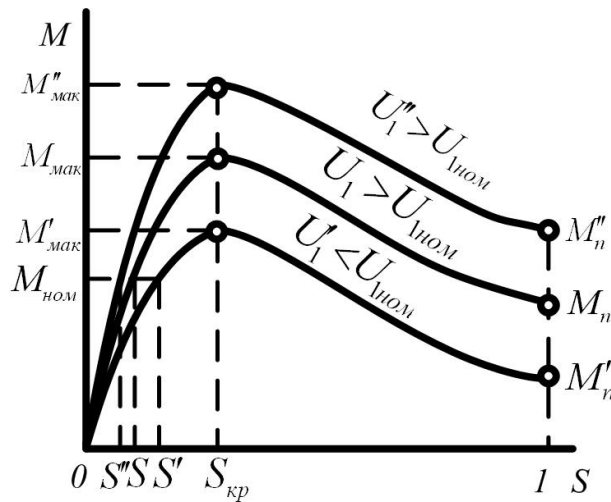


Рис. 4.19 – Вплив напруги на вид механічної характеристики асинхронного двигуна

Аналіз графіків $M = f(s)$, наведених на рисунку 4.20, також показує, що зміни опорі ротора r'_2 супроводжуються змінами частоти обертання: зі збільшенням r'_2 при незмінному навантажувальному моменті $M_{ст}$ ковзання збільшується, тобто частота обертання зменшується (точки 1, 2, 3 і 4).

Вплив активного опорі обмотки ротора на форму механічних характеристик асинхронних двигунів використовується при проектуванні двигунів. Наприклад, асинхронні двигуни загального призначення повинні мати “жорстку” швидкісну характеристику, тобто працювати з невеликим номінальним ковзанням. Це досягається застосуванням у двигуні обмотки ротора з малим активним опором

r'_2 . При цьому двигун має більш високий ККД за рахунок зниження електричних втрат в обмотці ротора ($P_{e2} = m_1 I_2'^2 r'_2$). Вибране значення r'_2 повинно забезпечити двигуну необхідне значення пускового моменту. При необхідності отримати двигун з підвищеним значенням пускового моменту збільшують активний опір обмотки ротора.

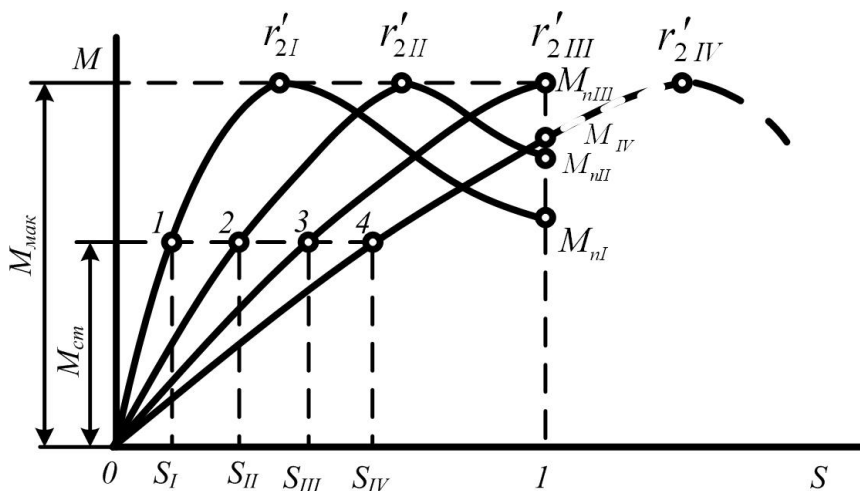


Рис. 4.20 – Вплив активного опору обмотки ротора на механічну характеристику асинхронного двигуна

Але при цьому отримують двигун з великим значенням номінального ковзання, а отже, з меншим ККД.

Розглянуті залежності $M = f(U_1)$ і $M = f(r'_2)$ також мають велике практичне значення при розгляді питань пуску і регулювання частоти обертання асинхронних двигунів.

Робочі характеристики асинхронного двигуна

Робочими характеристиками асинхронного двигуна називають залежність потужності, що споживається, P_1 первинного струму I_1 , коефіцієнта потужності $\cos \varphi_1$, моменту на валу M_2 , ковзання s і $ККД\eta$ від корисної потужності P_2 при роботі з номінальними напругами і частотою. Робочі характеристики дозволяють знаходити всі інші величини, що визначають режим роботи двигуна при різних навантаженнях. Ці характеристики можливо побудувати як за

розрахунковими даними при проектуванні двигуна, так і за експериментальними дослідженнями, при дослідах двигуна. На рисунку 4.21 зображені робочі характеристики асинхронного двигуна потужності 15 кВт. При $P_2 = 0$ величини I_1 і $\cos \phi_1$ відповідають режиму холостого ходу.

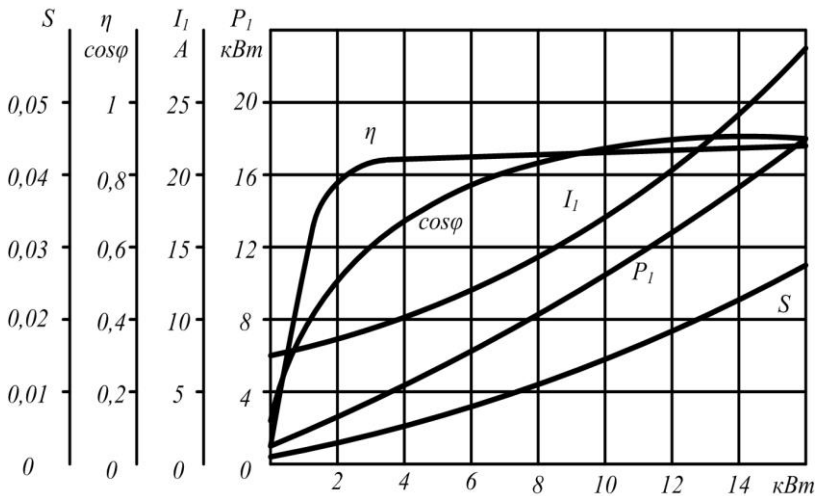


Рис. 4.21 – Робочі характеристики асинхронного двигуна 15 кВт

4.4 РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ І ПУСК У ХІД ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Прямий пуск при номінальній напрузі та пуск у хід при зниженій напрузі асинхронних короткозамкнених двигунів

Прямий пуск. Найбільш простим способом пуску короткозамкненого двигуна є включення обмотки статора його безпосередньо в мережу, на номінальну напругу обмотки статора (рис. 4.22, а). Такий пуск називається прямим. При цьому пусковий струм двигуна $I_n = (4-6,5)I_n$.

Сучасні короткозамкнені асинхронні двигуни проектуються з таким розрахунком, щоб вони за величиною виникаючих при пуску

електродинамічних зусиль, що діють на обмотки, і за умовами нагріву обмоток допускали прямий пуск. Тому прямий пуск завжди можливий, коли мережа досить потужна і пускові струми двигунів не викликають неприпустимо великих падінь напруг в ній (не більше 10–15%). Сучасні енергетичні системи, мережі і мережеві трансформаторні підстанції зазвичай мають такі потужності, так що в переважній більшості випадків прямий пуск асинхронних двигунів можливий. Нормальним способом пуску короткозамкнених двигунів є прямий пуск і нерідко таким чином здійснюється пуск двигунів потужністю у тисячі кіловат.

Якщо за умовами падіння напруги в мережі прямий пуск короткозамкненого двигуна неможливий, застосовуються різні способи пуску двигуна при зниженій напрузі (рис. 4.22, б, в і г). Однак при цьому пропорційно квадрату напруги на затискачах обмотки статора двигуна знижується також пусковий момент, що є недоліком пуску при зниженій напрузі. Тому ці способи пуску застосовують, коли можливий пуск двигуна на холостому ходу або під неповним навантаженням. Необхідність пуску при зниженій напрузі зустрічається найчастіше у потужних високовольтних двигунів.

Пуск двигуна з фазним ротором

Пуск двигуна з фазним ротором за допомогою пускового реостата. Двигуни з фазним ротором застосовуються значно рідше короткозамкнених. Вони використовуються в наступних випадках:

- коли короткозамкнені двигуни неприйнятні за умовами регулювання їх частоти обертання;
- за необхідності утворення двигуном підвищеного пускового моменту;
- коли приводяться в рух маси настільки великі, що теплова енергія, яка виділяється у вторинному колі двигуна, викликає неприпустимий нагрів обмотки ротора короткозамкненого двигуна.

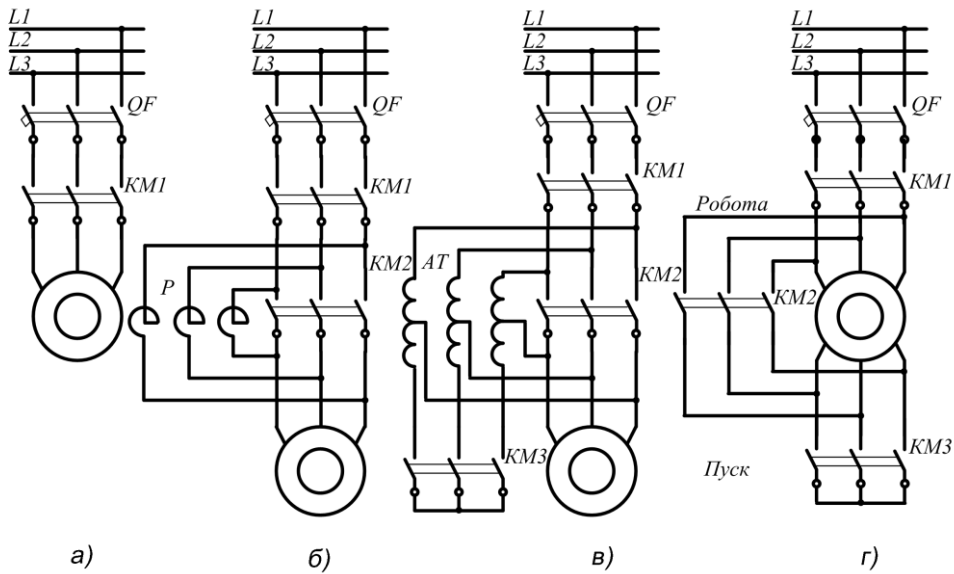


Рис. 4.22 – Схеми способів пуску короткозамкнених двигунів: а) – прямий; б) – реактивний; в) – автотрансформаторного; г) – з перемиканням зі “зірки” на “трикутник”

Пуск фазних двигунів проводиться за допомогою пускового реостата в колі ротора. Застосовуються дровові, з литими чавунними елементами, а також рідинні реостати. За умовами нагріву реостати розраховуються на короточасну роботу. Опори металевих реостатів для охолодження зазвичай поміщають у бак з трансформаторним маслом. Металеві реостати є ступінчастими, а перемикання з одного ступеня на інший здійснюється або вручну, за допомогою рукоятки контролера, істотним елементом якого є вал з укріпленими на ньому контактами, або ж автоматично (в автоматизованих установках) за допомогою контакторів або контролера з електричним приводом. Рідинний реостат – це посудина з електролітом (наприклад, водним розчином соди або кухонної солі), в який опущені електроди. Опір реостата регулюється зміною глибини занурення електродів.

Розглянемо пуск фазного двигуна за допомогою ступеневого металевого реостата (рис. 4.23), керованого контакторами КМ.

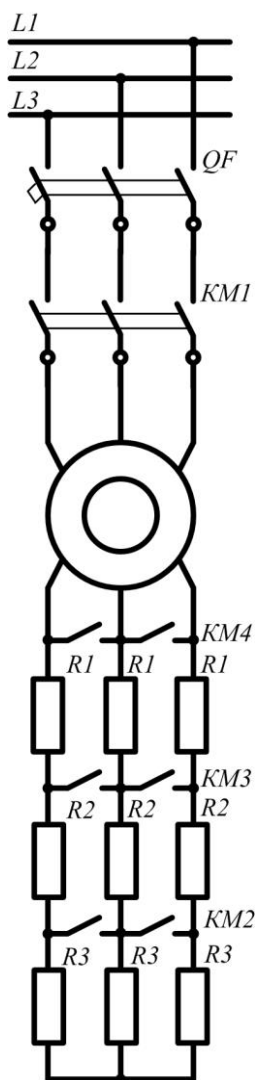


Рис. 4.23 – Схема пуску асинхронного двигуна за допомогою пускового реостата

Перед пуском щітки повинні бути опущені на контактні кільця ротора, а всі ступені реостата включені. Далі в процесі пуску по черзі включаються контактори KM_3 , KM_2 , KM_1 . Характеристики обертового моменту двигуна $M = f(s)$ і вторинного струму $I_2 = f(s)I$ при роботі на різних ступенях реостата зображені на рис. 4.24, а і б відповідно. Припустимо, що опори ступенів пускового реостата та інтервали часу перемикання ступенів підібрані так, що момент

двигуна M при пуску змінюється в межах від деякого $M_{\max}$ до деякого $M_{\min}$ і при включенні в мережу $M_n = M_{\max} > M_{\text{ст}}$ (крива 3 на рис. 4.24, а). На початку пуску двигун працює за характеристикою 3, ротор приходить в обертання, ковзання s починає зменшуватися і при $s = s_3$ коли $M \equiv M_{\min}$, проводиться перемикання реостата на ступінь 2. При цьому двигун буде працювати за характеристикою 2 і при подальшому розбігу двигуна ковзання зменшиться від $s = s_3$ до $s = s_2$, а момент – від значення $M = M_{\max}$ до $M = M_{\min}$.

Потім проводиться перемикання на ступінь 1 і т. д. Після виключення останнього ступеня реостата двигун переходить на роботу за природною характеристикою 0 і досягає сталої частоти обертання.

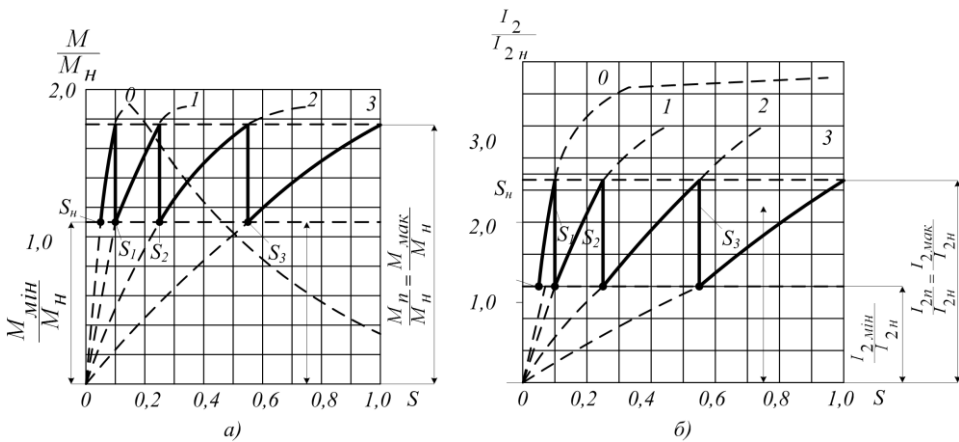


Рис. 4.24 – Послідовні зміни при реостатному пуску асинхронного двигуна: а) – обертового моменту; б) – струму

При наявності у двигуна короткозамикаючого механізму після закінчення пуску щітки за допомогою цього механізму піднімаються з контактних кілець і кільця замикаються накоротко, а реостат повертається в пускове становище. Тим самим пускова апаратура приводиться в готовність до наступного пуску. Необхідно відмітити, що дистанційне управління короткозамикаючим механізмом контактних кілець складно здійснити, – це утруднює автоматичне керування двигуном.

Пускові характеристики асинхронного двигуна при реостатному пуску найбільш сприятливі, тому що високі значення моментів досягаються при невисоких значеннях пускових струмів.

Регулювання частоти обертання зміною частоти струму, кількістю пар полюсів, опору реостату в колі ротора, величиною підведеної напруги та асиметрією підведеної напруги

Загальні положення. Частота обертання ротора асинхронного двигуна

$$n = n_1(1 - s) \quad (4.74)$$

Способи регулювання частоти обертання асинхронних двигунів, відповідно до виразу 4.74, можна підрозділити на два класи:

- регулювання частоти обертання первинного магнітного поля

$$n_1 = \frac{f_1}{p} \quad (4.75)$$

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

- регулювання ковзання двигуна s при $n_1 = \text{const}$. У першому випадку ККД двигуна залишається високим, а в іншому випадку ККД знижується

$$P_s = sP_{em} \quad (4.76)$$

і втрачається у вторинному колі двигуна (потужність ковзання використовується корисно тільки в каскадних установках).

Розглянемо основні способи регулювання частоти обертання.

Регулювання частоти обертання зміною первинної частоти (частотне регулювання) вимагає застосування джерел живлення з регульованою частотою (синхронні генератори зі змінною частотою обертання, іонні або напівпровідникові перетворювачі частоти та ін.) Тому цей спосіб регулювання використовується головним чином у випадках, коли для цілих груп двигунів необхідно підвищувати частоти ($n = 3000$ об/хв) обертання (наприклад, ручний інструмент металообробний, деякі механізми деревообробної промисловості та ін.) З розвитком напівпровідникових перетворювачів частоти все більш

перспективним стає індивідуальне частотне регулювання частоти обертання двигунів.

Якщо знехтувати відносно невеликим падінням напруги у первинному колі асинхронного двигуна, то

$$U_1 = E_1 = 4,44 f_1 W_1 k_{\text{об}} \Phi_\delta \quad (4.77)$$

Істотна зміна потоку Φ_δ при регулюванні n небажана, так як Φ_δ , що перевищує нормальний, викликає збільшення насичення магнітного кола і сильне збільшення намагнічуючого струму, а зменшення Φ_δ викликає недовикористання машини, зменшення перевантажувальної здатності і збільшення струму I_2 при незмінних значеннях M . Тому у більшості випадків доцільно підтримувати $\Phi_\delta = \text{const}$. При цьому з співвідношення 4.77 слідує, що одночасно з регулюванням частоти необхідно й пропорційно зменшувати напругу, тобто підтримувати

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (4.78)$$

Відступ від цього правила доцільно лише у випадку, коли M_{cm} швидко зменшується з зменшенням n (наприклад, у приводах вентиляторів, коли $M_{\text{cm}} = n^2$). У цьому випадку більш швидке зменшення U_1 , у порівнянні з f_1 , покращує енергетичні показники двигуна ($\cos \varphi_1$, і ККД), і в той же час зменшення M_m з точки зору перевантажувальної здатності не небезпечно.

Регулювання частоти обертання зміною числа пар полюсів p використовується тільки для короткозамкненого двигуна, так як при цьому потрібно змінювати p тільки для обмотки статора. Змінювати p можна двома способами:

1) застосуванням на статорі кількох обмоток, які покладені в загальних пазах і мають різне число пар полюсів p ;

2) застосуванням обмотки спеціального типу, яка дозволяє отримати різні значення p зміною (перемиканням) схеми з'єднання обмотки.

Запропоновано значну кількість різних схем обмоток з перемиканням кількості полюсів, проте широкого поширення отримали тільки деякі. Застосування кількох обмоток не вигідно, так як при цьому через обмеженість місця у пазах переріз провідників кожної із

обмоток потрібно зменшити, що призводить до зниження потужності двигуна. Використання з перемиканням обмоток кількості полюсів викликає ускладнення комутаційної апаратури, особливо якщо за допомогою однієї обмотки бажають одержати більше двох частот обертання або дві частоти обертання, відношення яких не рівне двом.

Двигуни з зміною числа пар полюсів називаються багатошвидкісними. Вони звичайно випускаються на 2, 3 або 4 частоти обертання, причому двошвидкісні двигуни виготовляються з однією обмоткою на статорі і з перемиканням числа пар полюсів $p_2 : p_1 = 2 : 1$, тришвидкісні двигуни – з двома обмотками на статорі, з яких одна виконується з перемиканням $p_2 : p_1 = 2 : 1$. Чотиришвидкісні двигуни – з двома обмотками на статорі, кожна з яких виконується з перемиканням кількості полюсів 2 : 1.

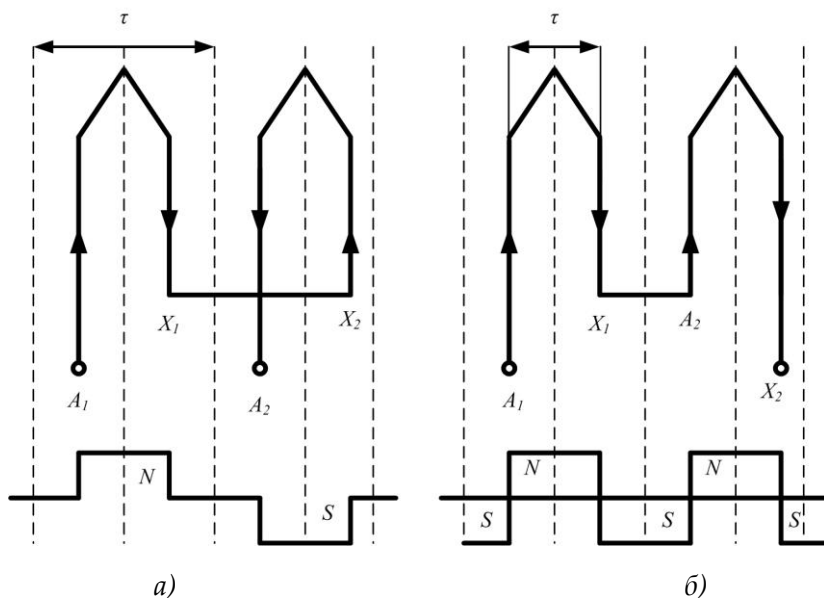


Рис. 4.25 – Принципова схема перемикання обмотки статора з співвідношенням чисел полюсів 2 : 1

Одним із можливих і широко застосовуваних способів перемикання обмотки на різні числа полюсів є зміна напрямку струму в окремих її гілках. На рис. 4.25 наведена принципова схема з перемиканням фазної обмотки з співвідношенням чисел полюсів 2 : 1.

Там же схематично показано розподіл МПС, утвореної струмом обмотки. Видно, що при напрямках струму, показаних на рисунку 4.25,

а і б, утворюються обмотки з кількістю полюсів, рівною 2 і 4 відповідно. Слід мати на увазі, що подібні перемикання проводяться у всіх фазах одночасно і що можливо не тільки послідовне, а й паралельне з'єднання окремих частин фазної обмотки. При таких переключеннях змінюється відносний крок обмотки, а також структура магнітного поля якоря у повітряному зазорі. Це призводить до певного погіршення енергетичних показників багатошвидкісних двигунів. Існуючі схеми переключення обмоток дозволяють забезпечити при переході від однієї частоти обертання до іншої або постійного номінального обертального моменту, або постійної номінальної потужності.

Маса і вартість багатошвидкісних двигунів значно більше, ніж ті ж характеристики нормальних асинхронних двигунів такої ж потужності. Проте їх використання – це найкращий і найшпоширеніший спосіб регулювання частоти обертання короткозамкнених двигунів.

Регулювання частоти обертання зменшенням напруги. При зменшенні U_1 момент двигуна змінюється пропорційно U_1^2 і відповідно змінюються механічні характеристики (рис. 4.26), в результаті чого змінюються також значення робочих ковзань $s_1, s_2, s_3 \dots$ при цьому виді залежності $M_{\tilde{n}\tilde{o}} = f(s)$. Очевидно, що регулювання s у цьому випадку можливо у межах $0 < s < s_{\text{мак}}$.

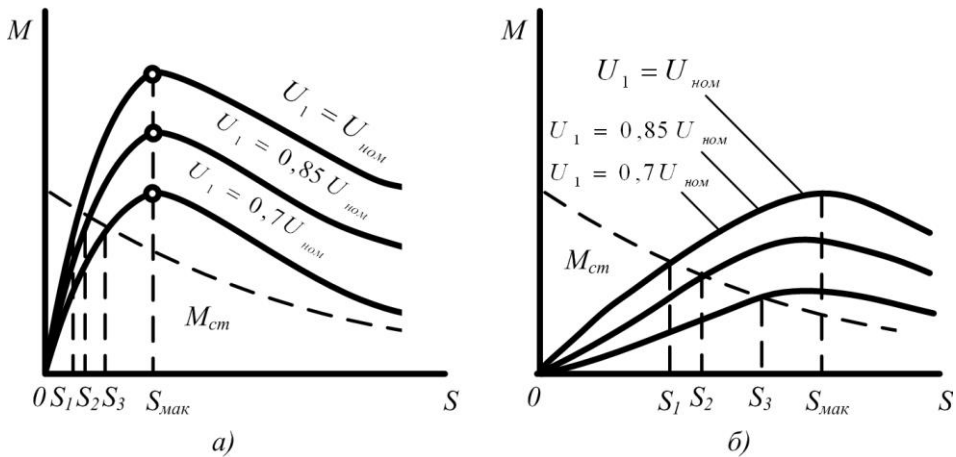


Рис. 4.26 – Механічні характеристики асинхронних двигунів при різних значеннях первинної напруги: а) – при малих; б) – при великих значеннях активного опору кола ротора

Для отримання досить великого діапазону регулювання частоти обертання необхідно, щоб активний опір кола ротора і, відповідно, s були досить великі (рис. 4.26. б). Слід враховувати, що при підвищенні ковзання у вторинному колі збільшуються втрати, рівні потужності ковзання P_s , що викликають підвищений нагрів ротора.

Метод регулювання, що описується, застосовується також для двигунів з фазним ротором, причому в цьому випадку в коло ротора вмикають додатковий опір.

У зв'язку з пониженням ККД і складністю регулювання напруги цей спосіб застосовується тільки для двигунів малої потужності (рис. 4.27) при цьому для регулювання U_1 можна використовувати регульовані автотрансформатори або опори, включені послідовно в первинне коло.

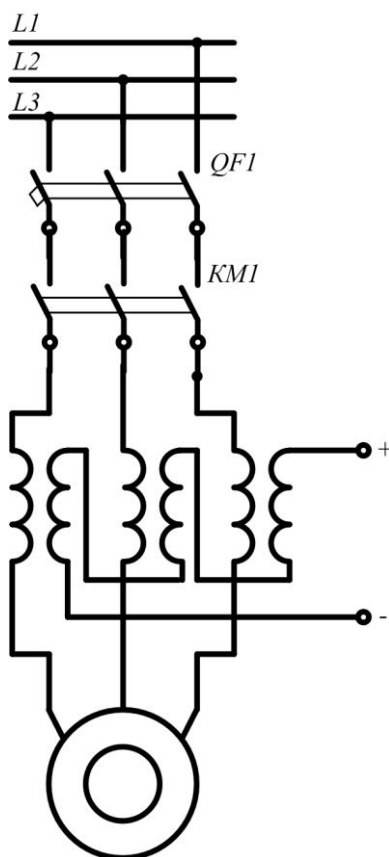


Рис. 4.27 – Схема регулювання частоти обертання асинхронного двигуна за допомогою реактора з підмагнічуванням постійного струму

В останні роки з цією метою частіше застосовують реактори насичення, що регулюються шляхом підмагнічування постійним струмом.

При зміні величини постійного струму індуктивний опір реактора змінюється, що призводить до зміни напруги на затискачах двигуна. Автоматичним регулюванням струму підмагнічування можна розширити зону регулювання частоти обертання в область $s > s_{\text{мак}}$ і отримати при цьому жорсткі механічні характеристики.

Імпульсне регулювання частоти обертання (рис. 4.28) виконується періодичним включенням двигуна в мережу і відключенням його від мережі або періодичним шунтуванням за допомогою контактора КМ опорів, послідовно включених в коло статора.

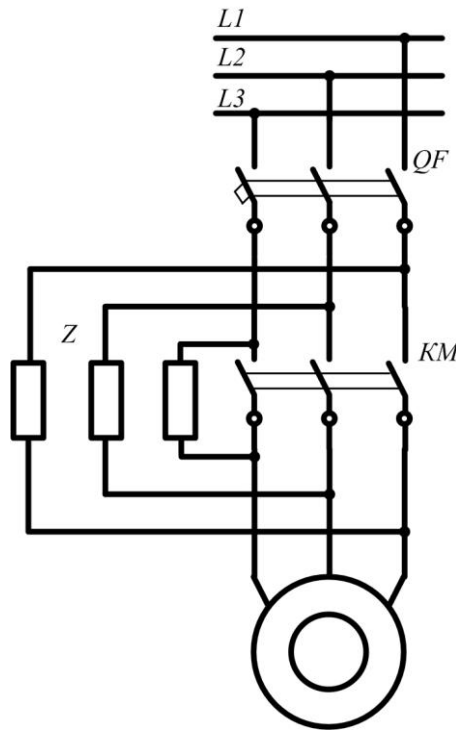


Рис. 4.28 – Схема імпульсного регулювання частоти обертання асинхронного двигуна

При цьому двигун постійно знаходиться в перехідному режимі прискорення або уповільнення частоти обертання ротора і залежно від частоти і тривалості імпульсів працює з деякою середньою постійною

частотою обертання. Подібне регулювання частоти обертання пов'язане зі значним погіршенням енергетичних показників і застосовується тільки для двигунів дуже малої потужності ($P_n < 30 - 50 \text{ Вт}$).

Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів з фазним ротором. Для фазних двигунів можна, в принципі, використувати ті ж способи регулювання частоти обертання, що і для короткозамкнених двигунів. Однак на практиці застосовується іноді тільки спосіб регулювання частоти обертання за допомогою реакторів насичення. Далі розглянемо способи регулювання частоти обертання, які специфічні для двигунів з фазним ротором і в яких використовується можливість включення регулювальних пристроїв у вторинне коло.

Регулювання частоти обертання за допомогою реостата в колі ротора проводиться за тією ж схемою, що і реостатний пуск фазного двигуна, але реостат при цьому повинен бути розрахований на тривалу роботу. При збільшенні активного опору вторинного кола вид механічної характеристики двигуна змінюється: характеристика стає більш м'якою і ковзання двигуна при тому ж моменті навантаження M_{c1} збільшується.

При $M_{cm} = \text{const}$ робочого ковзання s з більшою точністю пропорційне $s_{\text{мак}}$ і, отже, активному опору кола ротора. Тому ковзання s і s' , відповідає випадкам $r_\delta = 0$ і $r_\delta \neq 0$, що перебувають у співвідношенні

$$\frac{s'}{s} = \frac{r_\delta + r_2}{r_2},$$

звідки значення r_δ , необхідне для отримання ковзання s' ,

$$r_\delta = \left(\frac{s'}{s} - 1 \right) r_2 \quad (4.79)$$

Даний спосіб регулювання частоти обертання пов'язаний зі значними втратами енергії в опорі і тому малоекономічний. Він застосовується головним чином при короткочасному або повторно-короткочасному режимі роботи (наприклад, пусконаладжувальні режими деяких машин, кранові пристрої та ін.), а також у приводі з вентиляторним моментом. У останньому випадку потужність на валу зі зменшенням частоти обертання швидко знижується, і тому потужність ковзання і втрати у колі ротора обмежені.

До недоліків реостатного регулювання частоти обертання відноситься також м'якість механічних характеристик і залежність діапазону регулювання від навантаження. Зокрема, регулювання частоти обертання на холостому ходу практично неможливо.

Регулювання частоти обертання введенням додаткової ЕРС у вторинне коло двигуна. Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів шляхом збільшення його ковзання завжди пов'язане з виділенням у вторинному колі двигуна значної електричної потужності ковзання

$$P_s = sP_{em},$$

яка при реостатному регулюванні майже цілком втрачається в реостаті. Природно, що цю потужність краще використати корисно, підвищуючи ККД установки. Корисно використовувати потужність ковзання можна, якщо замість реостата підключити до контактних кілець фазного двигуна споживач електричної енергії у вигляді відповідної допоміжної електричної машини. Ця допоміжна машина може бути і джерелом електричної енергії як збудник асинхронної машини з боку ротора. У зв'язку з цим розглянемо питання про вплив на роботу фазного асинхронного двигуна зовнішньої додаткової ЕРС E_δ , що вводиться у вторинне коло двигуна за допомогою його контактних кілець, за умови, що частота цієї додаткової ЕРС завжди дорівнює частоті вторинного струму і частоті ЕРС $f_2 = sf_1$ самого двигуна.

Припустимо, що асинхронний двигун з фазним ротором працює за умови, що U_1 , f_1 , M_2 постійні. Вважаючи у порядку допущення, що $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$, можна вважати, що потік Φ_δ також постійний, а комплекс Φ_δ відстає від $\dot{U}_1$, на $\pi/2$.

Струм у колі ротора I_2 дорівнює

$$\dot{I}_2 = \frac{s \dot{E}_2}{r_2 + jsx_{\sigma 2}}$$

або

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{\sigma 2})^2}}.$$

Врахуємо, що в режимах роботи з $s < s_{\max}$ величина $r_2 \gg s x_{\sigma 2}$. У таких умовах комплекси $s\dot{E}_2$ і $\dot{I}_2$ можна вважати співпадаючими. Векторну діаграму для $\dot{U}_1$, $s\dot{E}_2$, $\dot{I}_2$ можна представити так, як показано на рисунку 4.29, а.

Введемо в коло ротора додаткову ЕРС E_δ (частоти ковзання), спрямовану зустрічно ЕРС $s\dot{E}_2$. Оскільки в цьому випадку результуюча ЕРС в колі ротора зменшиться до величини $s\dot{E}_2 - E_\delta$, то і струм $I_2 = \frac{s\dot{E}_2 - E_\delta}{r_2}$ зменшиться в $\frac{s\dot{E}_2 - E_\delta}{s\dot{E}_2}$ разів.

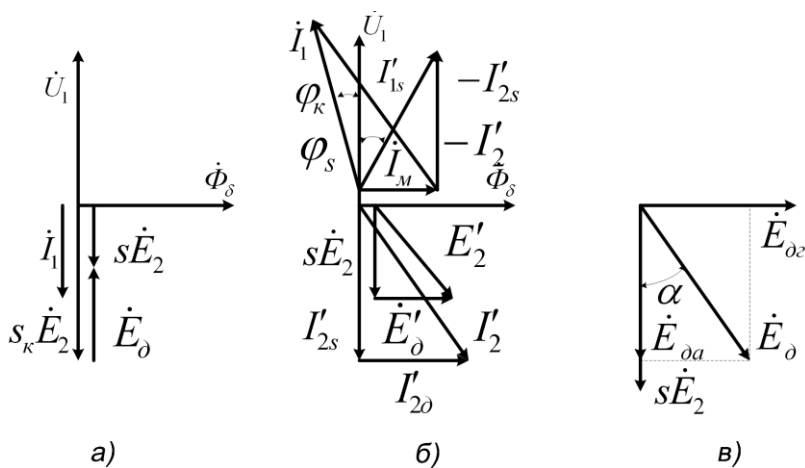


Рис. 4.29 – Спрощені векторні діаграми асинхронного двигуна, приведені в коло ротора додаткової ЕРС E_δ

При цьому електромагнітний момент $M_{em} = c_m I_2 \Phi_\delta$ зменшиться в такому ж відношенні. У зв'язку з цим порушиться баланс моментів $M_2 - M_{em} > 0$ на користь статичного моменту на валу ($M_2 = const$).

У результаті частота обертання двигуна почне зменшуватися до тих пір, поки струм ротора I_2 , а значить, і M_{em} не досягнуть своїх попередніх значень. Встановляться нові значення ковзання s_κ і ЕРС ротора $s_\kappa E_2$, що відповідають новим (після введення E_δ) режиму, що встановився.

З рівності струмів ротора у вихідному $I_2 = \frac{sE_2}{r_2}$ і новому $I_2 = \frac{S_{\text{мак}}E_2 - E_\delta}{r_2}$ режимах знайдемо

$$s_\kappa = s + \frac{E_\delta}{E_2} \quad (4.80)$$

Очевидно, що якщо ввести додаткову ЕРС E_δ згідно з основною ЕРС $s\dot{E}_2$, то швидкість збільшиться, а ковзання зменшиться.

У загальному випадку можна вважати, що

$$s_\kappa = s \pm \frac{E_\delta}{E_2} \quad (4.81)$$

де знак “+” відповідає зустрічному, а “-” – узгодженому включенню додаткової ЕРС E_δ .

Таким чином, введенням додаткових ЕРС у коло ротора асинхронного двигуна можна регулювати його частоту обертання як на зниження, так і на підвищення.

Введенням додаткових ЕРС у коло ротора асинхронних машин можна також регулювати коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$. Фізика такого регулювання ілюструється векторною діаграмою, наведеною на рис. 4.29, б. Ця діаграма відповідає таким же умовам режиму, як і на рис. 4.29, а.

Тут розглянемо випадок, коли фазовий кут зсуву додаткової ЕРС E_δ по відношенню до основної ЕРС $s\dot{E}_2$ складає $\frac{\pi}{2}$ радіан. (Нагадаємо, що оскільки на цій векторній діаграмі зображуються електромагнітні величини первинної і вторинної обмотки, то всі величини, що відносяться до обмотки ротора, попередньо приводяться до обмоток статора.) Видно, що при такому введенні ЕРС E_δ у коло ротора окрім струму I'_{2s} , зумовленого основною ЕРС sE_2 , виникає реактивна складова $I'_{2\delta}$, зумовлена введеною ЕРС. У даному випадку ця складова буде ємнісною. Тому в струмі статора змінюється навантажувальний струм I'_2 за рахунок її реактивної, в цьому випадку ємнісної, складової. В результаті змінюються величина струму I_1 і $\cos \varphi_1$. У даному випадку нове значення кута зсуву φ_κ між U_1 і I_1 після введення додаткової ЕРС виявляється менше нуля. Отже, двигун вже не споживає, а генерує в мережу реактивну потужність. Намагнічування, тобто збудження, двигуна відбувається з боку ротора від джерела додаткової ЕРС E_δ .

Очевидно також, що якщо додаткові ЕРС $\dot{E}_0$ вводити в коло ротора під деяких кутom α до ЕРС $s\dot{E}_2$ (рис. 4.29), то можна одночасно регулювати і частоту обертання двигуна через складову $\dot{E}_{da}$, і коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$.

Розглянутий спосіб регулювання частоти обертання асинхронного двигуна з фазним ротором досить економічний і забезпечує широкий діапазон регулювання. Труднощі, які при цьому виникають, обумовлені головним чином способом отримання регульованого додаткової напруги частоти ковзання. Таку напругу, зокрема, можна отримати на базі колекторного перетворювача частоти, що й було реалізовано у двигуні Шраге-Ріхтера.

Зміна напрямку обертання і гальмування асинхронних електродвигунів

Для зміни напрямку обертання (реверсування) ротора трифазного асинхронного двигуна необхідно змінити напрямок обертання обертового магнітного поля в статорі. Для цього потрібно поміняти місцями два будь-яких кабелі, що підводять струм до обмотки статора. Для реверсування двигунів застосовують реверсивний барабанний перемикач (рис. 4.30).

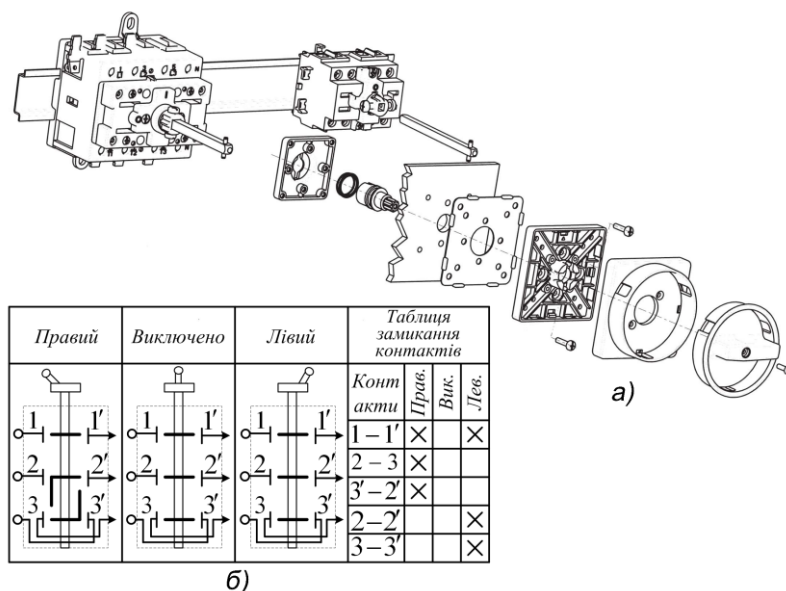


Рис. 4.30 – Реверсивний барабанний перемикач:

а) – загальний вигляд, б) – схема

При повороті рукоятки перемикача вправо з'єднуються контакти 1–1'; 2–3; 3'–2', двигун обертається в певному напрямку. При середньому положенні рукоятки перемикача всі контакти розімкнені, двигун відключений від мережі. При повороті рукоятки перемикача вліво замикаються контакти 1–1'; 2–2'; 3–3', при цьому порядок чергування фаз змінюється і ротор електродвигуна змінює напрямок обертання.

Гальмування асинхронних двигунів здійснюють методом противмикання, змінивши напрямок обертання обертового магнітного поля статора щодо напрямку обертання ротора. Для цього, як і при реверсуванні, змінюють порядок чергування фаз на ходу двигуна. Так як ротор за інерцією буде продовжувати обертатися у попередньому напрямку, то ковзання стає більше одиниці

$$s = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} > 1$$

Так як електромагнітний момент, створюваний обертовим полем статора, спрямований проти напрямку обертання ротора, то він є гальмуючим відносно ротора, і ротор внаслідок цього дуже швидко зупиняється. Якщо обмотки статора не відключити своєчасно від мережі, то ротор розвернеться в протилежному напрямку.

Так як ковзання стає більше одиниці, а електричні втрати в роторі $P_{м,рот} = sP_{ем}$, то при гальмуванні електричні втрати будуть більші електромагнітної потужності. Частина потужності, що витрачається на втрати в міді ротора при гальмуванні, є електромагнітною, передається через магнітне поле від статора до ротора, а частина цих втрат покривається за рахунок механічної потужності частин двигуна і робочої машини, що обертаються за інерцією.

При гальмуванні противмиканням спостерігаються значні кидки струму при перемиканні проводів обмотки статора і перегріві обмотки ротора.

Порівняння різних способів регулювання частоти обертання

Якщо звернутися до формули, що зв'язує частоту обертання ротора з частотою обертання поля і ковзанням,

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (4.82)$$

то з неї виходить, що є всього три варіанти регулювання швидкості: шляхом зміни частоти мережі f , числа пар полюсів p і ковзання s .

Найбільш перспективним способом регулювання частоти обертання асинхронного двигуна є частотний. Зміна частоти, що підводиться до двигуна, здійснюється перетворювачем частоти. При частотному регулюванні змінюється синхронна частота обертання (частота обертання поля), а двигун працює з невеликим ковзанням. Регулювання економічне, проте через перетворювач частоти проходить уся потужність і габарити перетворювача частоти перевищують габарити двигуна. При перетворенні частоти і напруги мережі перетворювач частоти змінює напругу і частоту на виході

згідно із законом $\frac{V}{f} = \text{const}$, що забезпечує роботу асинхронного двигуна при постійному магнітному потоці.

Як видно з формули, змінюючи число полюсів, можна змінювати числа оборотів ротора. На цьому принципі ґрунтується робота багатошвидкісних асинхронних електродвигунів, що застосовуються в металорізальних верстатах, на елеваторах і транспортерах, в підйомних установках, кранах і насосних установках.

Двошвидкісні електродвигуни можна розділити за кратністю відношення швидкостей на електродвигуни з відношенням швидкостей кратним і некратним двом. Перші майже завжди виконують з однією обмоткою, яка перемикається на різні числа полюсів, другі – з двома окремими обмотками.

Багатошвидкісні електродвигуни можуть бути виконані на 3 або 4 швидкостях. Щоб уникнути складних пристроїв для перемикавання обмотки ротора, багатошвидкісні двигуни виконують з короткозамкненим ротором.

Найбільш простим способом, що забезпечує плавне регулювання частоти обертання асинхронного двигуна, є зміна ковзання. Принциповим недоліком цього способу регулювання частоти

обертання є низький ККД, оскільки втрати в роторі пропорційні ковзанню. І які б не пропонувалися варіанти схем зміни ковзання, а їх існують десятки, в електромеханічному перетворювачі енергії можливості перетворення в теплоту і в механічну потужність однакові.

Застосування багатошвидкісних електродвигунів дозволяє спростити передачі; підвищити продуктивність установок; усунути шуми і вібрації від роботи зубчастих передач; спростити автоматичне управління процесами пуску, зупинки, реверсування і гальмування і, нарешті, що дуже важливо, підвищити коефіцієнт корисної дії установки завдяки зниженню втрат в передачах.

Двигуни з подвійною білячою кліткою та глибоким пазом у роторі: їх будова, принцип дії, механічні характеристики, переваги й недоліки, застосування

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором дуже прості за конструкцією і надійні в експлуатації, але вони мають великий пусковий струм і малий пусковий момент.

Для поліпшення пускових властивостей Доливо-Добровольський у 1893 р. запропонував конструкцію асинхронного двигуна з подвійною білячою кліткою. Пізніше був сконструйований двигун з глибоким пазом, що має поліпшені пускові властивості.

Двигуни з подвійною білячою кліткою виготовляють звичайно середніх і великих потужностей, а з глибоким пазом – навіть невеликих потужностей (2–3 кВт).

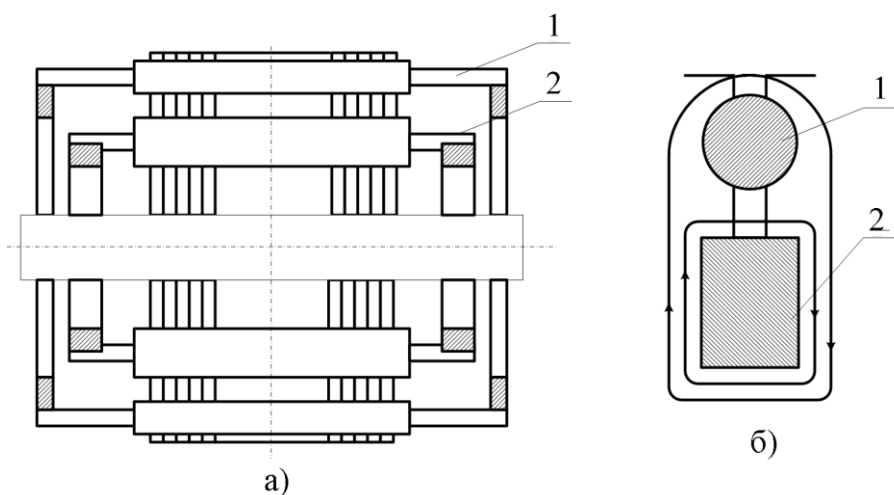
У двигуна з подвійною білячою кліткою статор звичайний, а ротор має дві білячі клітки (рис. 4.31, *а*). Зовнішня біляча клітка 1 володіє великим активним опором, так як її виготовляють із матеріалів з підвищеним активним опором (марганцевої бронзи або латуні), стрижні роблять невеликого перетину, а внутрішню клітку виготовляють з міді великого пертину, тому вона має малий активний опір. Індуктивний опір зовнішньої білячої клітки дуже малий, так як вона розташована близько до поверхні ротора і охоплюється малою кількістю магнітних силових ліній, а індуктивний опір внутрішньої клітки 2 дуже великий, тому що вона охоплюється великою кількістю магнітних силових ліній (рис. 4.31, *б*). Щілина між клітками робиться для того, щоб магнітні силові лінії, що утворюються навколо проводів клітки 1, охоплювали клітку 2, так як їм легше пройти по сталі

навколо клітки 2, ніж по повітрю через щілину між клітками. Це сприяє ще більшому збільшенню індукційного опору другої клітки.

У момент пуску двигуна, коли $s=1$, частота струму ротора дорівнює частоті мережі, а індуктивний опір ротора максимальний, оскільки він залежить від частоти. Перша клітка володіє малим індуктивним опором і великим активним, тому основний пусковий момент створює перша клітка і її називають пусковою. Хоча в першій клітці проходить і незначний за величиною струм, але так як $M = C_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2$, а активна складова струму велика, то момент буде великий.

По мірі розгону двигуна ковзання зменшується і частота струму в роторі також зменшується. Внаслідок цього зменшується і індуктивний опір ротора, що при досягненні ротором двигуна номінальних оборотів буде дуже малий, тому що частота струму в роторі дорівнює 2–3 Гц. Тому при роботі двигуна більша частина струму буде проходити по другій клітці, так як вона має малий активний опір.

Другу клітку називають робочою.



1 – пускова клітка, 2 – робоча клітка

Рис. 4.31 – Ротор двигуна з подвійною білячою кліткою:
а) – загальний вид ротора, б) – паз ротора

Обертовий момент двигуна M дорівнює сумі моментів першої M_n і другої M_p клітки $M = M_n + M_p$ (рис. 4.32). Тут крива 1 показує зміну моменту пускової клітки, крива 2 – робочої, а крива 3 – зміну обертового моменту двигуна із зміною ковзання.

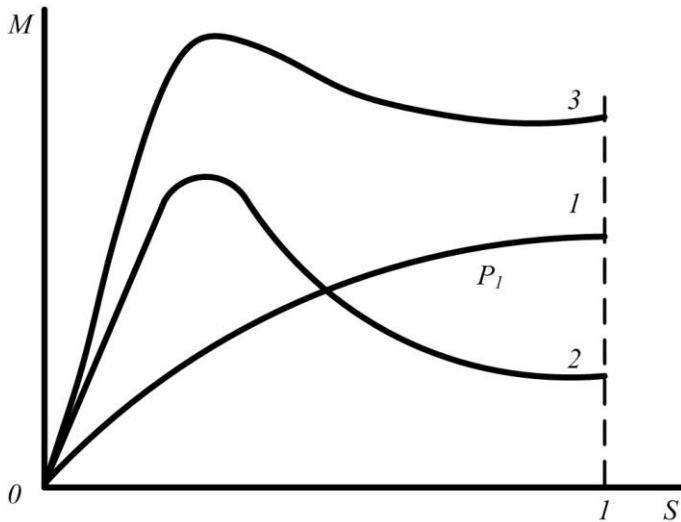


Рис. 4.32 – Криві залежності обертових моментів від ковзання двигуна з подвійною білячою кліткою

Статор двигуна з глибоким пазом також не відрізняється від статора звичайного короткозамкненого двигуна, але пази ротора виконують подовженими, тобто глибокими, у них закладають стрижні у вигляді тонких і високих смуг або заливають алюміній.

На рисунку 4.33, а зображено розподіл магнітного потоку розсіювання навколо стрижня. Нижня частина стрижня охоплюється більшим числом магнітних силових ліній, ніж верхня, внаслідок чого індуктивний опір нижньої частини стрижня, обумовлений величиною магнітного потоку розсіювання, значно більший, ніж у верхній.

Так як при пуску двигуна в хід, в початковий момент, коли ротор ще нерухомий, частота струму в роторі дорівнює частоті мережі, то індуктивний опір ротора буде найбільшим.

У момент пуску струм з нижньої частини стрижня, що має більший індуктивний опір, ніж верхня, буде витіснятися у верхню (рис. 4.33, б). Внаслідок цього як би зменшується переріз стрижня і збільшується його активний опір. Зростання активного опору

стрижнів призводить до збільшення пускового моменту і зменшення пускового струму.

При роботі двигуна частота струму в роторі невелика (2–3 Гц) і індуктивний опір стрижнів, що залежить від частоти, незначний. Тому струм розподіляється рівномірно по всьому стрижню, і двигун працює як звичайний короткозамкнений.

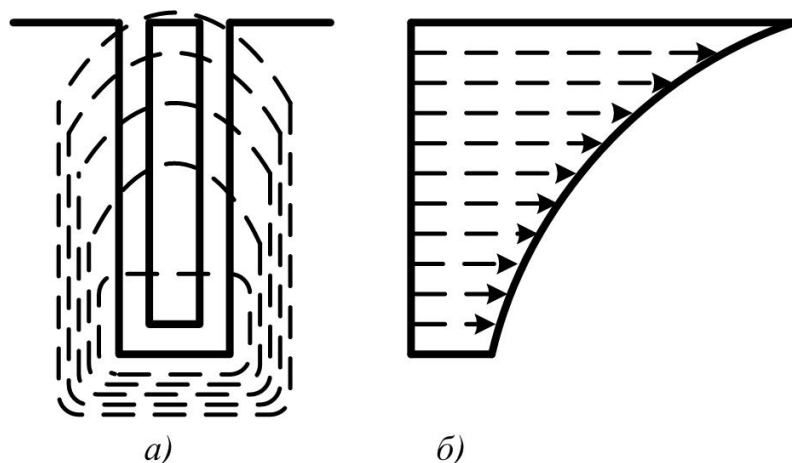


Рис. 4.33 – Двигун з глибоким пазом: а) – паз ротора;
б) – розподіл струму в пазу при пуску двигуна в хід

До недоліків двигунів з подвійною білячою кліткою і глибоким пазом відносять більш низькі ККД і $\cos \varphi$, а також знижену перевантажувальну здатність у порівнянні з звичайними короткозамкненими двигунами. Вартість їх вище, ніж звичайних короткозамкнених, що викликано складністю виготовлення ротора.

У порівнянні зі звичайними пускові властивості цих двигунів наступні.

Двигун	$\frac{I_n}{I_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$
Звичайний короткозамкнений	4,5–8	0,9–1,7
З подвійною кліткою	3,0–5,5	1,0–3,0
З глибоким пазом	3,5–5,0	1,2–1,6

4.5 ОДНОФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

Принцип дії і будова однофазних асинхронних двигунів

За своєю будовою однофазний асинхронний двигун аналогічний трифазному і складається із статора, в пазах якого укладена однофазна обмотка, і короткозамкненого ротора. Особливість роботи однофазного асинхронного двигуна полягає в тому, що при включенні однофазної обмотки статора $C1-C2$ в мережу (рис. 4.34). МРС статора створює не обертовий, а пульсуючий магнітний потік, з амплітудою $\Phi_{\text{мак}}$, що змінюється від $+\Phi_{\text{мак}}$ до $-\Phi_{\text{мак}}$. При цьому вісь магнітного потоку залишається нерухомою в просторі.

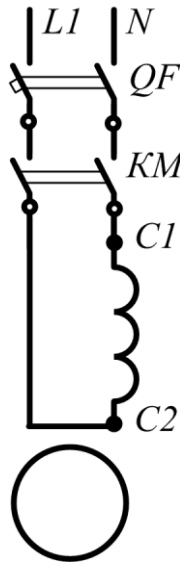


Рис. 4.34 – Схема включення однофазного асинхронного двигуна

Для пояснення принципу дії однофазного двигуна пульсуючий потік $\Phi_{\text{мак}}$ розкладемо на два, що обертаються в протилежні сторони потоки $\Phi_{\text{нр}}$ і $\Phi_{\text{зв}}$ (рис. 4.35), кожен з яких рівний $0,5\Phi_{\text{мак}}$ і обертається з частотою (об/хв)

$$n_{\text{нр}} = n_{\text{зв}} = \frac{f_1 60}{p} = n_1$$

Якщо на статорі асинхронного двигуна виконати одну фазу обмотки, то при протіканні по ній однофазного струму створюватиметься пульсуюче магнітне поле.

Змінне пульсуюче поле Φ може бути замінене двома, що обертаються в різні боки із швидкістю $n = \pm \frac{60 f_1}{p}$, величини яких дорівнюють половині амплітуди пульсуючого поля

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\Phi_m}{2}$$

Така заміна можлива, оскільки ці два поля Φ_1 і Φ_2 , що обертаються в різні боки, створюють еквівалентне пульсуюче поле Φ (рис. 4.35).

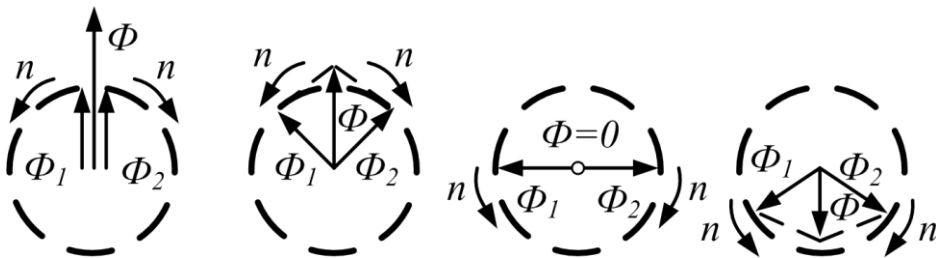


Рис. 4.35 – Розкладання пульсуючого поля на два, що обертаються

Поля, що обертаються, індукуватимуть в нерухомій обмотці ротора однакові за величиною, але протилежні за знаком ЕРС і струми, внаслідок чого до ротора буде прикладено два однакових за величиною, але протилежних за знаком моментів, що обертаються. Тому початковий момент, що обертає, буде відсутній, і двигун не зможе розвернутися.

Якщо ж сторонньою силою розкрутити ротор двигуна, то він обератиметься і може бути навантажений.

Аналогічне явище спостерігається в трифазних двигунах при обриві одного з проводів або перегоранні запобіжника в одній з фаз двигуна.

При обриві фази на ходу в трифазного асинхронного двигуна він продовжуватиме обертатися і розвивати близько $\frac{1}{2} - \frac{2}{3}$ своєї номінальної потужності. Пустити ж такий двигун в хід можна лише в тому випадку, якщо розкрутити його стороннім зусиллям.

Поле, що обертається в ту ж сторону, що і ротор, називають прямим полем, а у бік, протилежний до обертання ротора, – зворотним.

Швидкість прямого поля Φ_1 відносно ротора дорівнює різниці швидкостей поля і ротора

$$n_1 - n_2 = n_1 - n_1(1-s) = n_1 s \quad (4.83)$$

Пряме поле індукує в роторі струм частотою $f_2 = sf_1$, тобто приблизно 2–5 Гц. Швидкість зворотного поля Φ_2 відносно ротора дорівнює сумі швидкостей поля і ротора

$$n_1 + n_2 = n_1 + n_1(1-s) = n_1(2-s) \quad (4.84)$$

Зворотне поле індукує в роторі струми частотою $f_2 = f_1(2-s)$, тобто приблизно 95–98 Гц.

Струм, що індукується прямим полем, взаємодіючи з ним, створює великий момент, що обертає, оскільки активна складова цього струму унаслідок малої частоти буде значною.

Струм, що індукується зворотним полем, при взаємодії з ним створить невеликий момент, що обертає, унаслідок того, що частота цього струму велика, а активна складова струму незначна.

Оскільки ці моменти M_1 і M_2 направлені в різні боки, то результуючий момент двигуна M дорівнюватиме різниці моментів $M = M_1 - M_2$ і направлений в сторону більшого моменту M_1 .

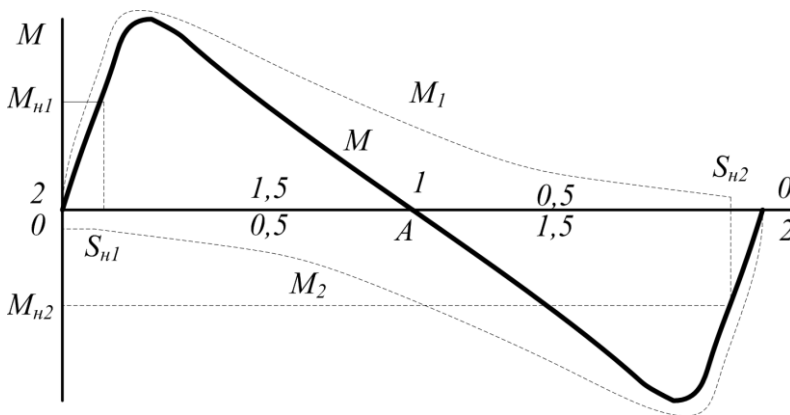


Рис. 4.36 – Криві обертальних моментів однофазного двигуна залежно від ковзання

На рисунку 4.36 представлені графіки залежності моментів, що обертають, прямого M_1 і зворотного M_2 полів і сумарного моменту M від ковзання.

При ковзанні $s=1$ обертальний момент $M_1 = M_2$, а сумарний момент M дорівнює нулю.

Якщо двигун ротора розкрутити, припустимо, за напрямом руху годинникової стрілки, то пряме поле створить обертальний момент M_1 при ковзанні s_{n1} , а зворотне поле – момент M_2 , яке дуже мале за величиною, унаслідок чого результуючий момент M_{n1} досягне значної величини. Якщо під час пуску двигуна ротор розкрутити в протилежну сторону, то двигун розвиває обертальний момент M_{n2} при ковзанні s_{n2} , який прикладений до валу двигуна в протилежному напрямі (рис. 4.36).

Для розкручування ротора при пуску застосовують різні пускові пристрої, наприклад, пускову обмотку, розщеплення магнітного потоку полюсів та ін.

Пускову обмотку B виконують на статорі, зсунутою на 90° відносно робочої обмотки A . Струми в цих обмотках зсуваються за фазою на кут, близький до 90° . Зсув струмів досягається шляхом включення в коло пускової обмотки конденсатора C або активного опору R (рис. 4.37, а). Інколи пускова обмотка виконується з малої кількості витків проводу невеликого перетину, а робоча – з великої. Внаслідок цього робоча обмотка має великий індуктивний опір, а пускова – малий індуктивний і великий активний, чим також досягається зсув струмів в обмотках по фазі на кут, близький до 90° (рис. 4.37, б). Пускова обмотка включається лише на час пуску, а після розгону ротора відразу ж вимикається.

Пускова і робоча обмотки розділені на дві частини, що дозволяє включати двигун на різну напругу – 127 В або 220 В, з'єднуючи обмотки паралельно (рис. 4.37, в) або послідовно (рис. 4.37, б).

У деяких двигунах робоча обмотка і обмотка з конденсатором в колі залишається включеною на весь час роботи. Такі двигуни називаються конденсаторними. Вони мають кращі робочі і пускові характеристики – кращий $\cos \varphi$ і велику перевантажувальну здатність.

Двигуни з пусковою обмоткою і конденсаторні двигуни, схеми пуску

Асинхронний конденсаторний двигун має на статорі дві обмотки, що займають однакове число пазів і зсунуті в просторі відносно один одного на 90 ел. град. Одну з обмоток – головну – включають безпосередньо в однофазну мережу, а іншу – допоміжну – включають в цю ж мережу, але через робочий конденсатор $C_{роб}$ (рис. 4.38).

На відміну від розглянутого раніше однофазного асинхронного двигуна в конденсаторному двигуні допоміжна обмотка після пуску не відключається і залишається включеною протягом всього періоду роботи, при цьому ємність $C_{роб}$ створює фазовий зсув між струмами I_A та I_B .

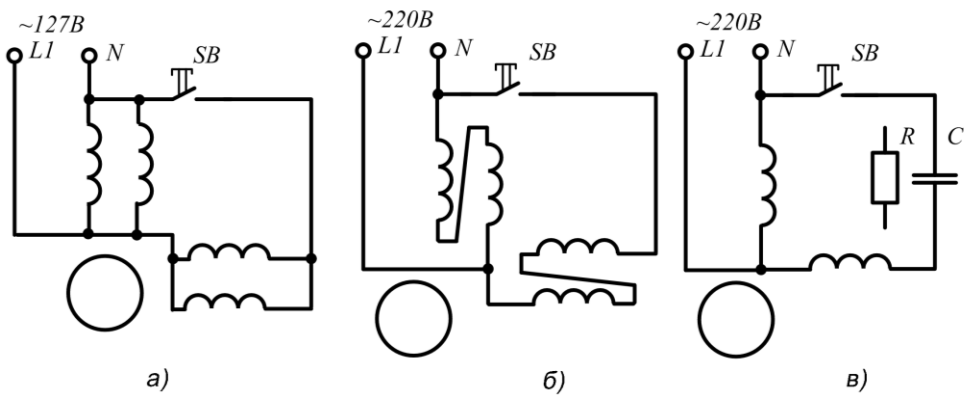


Рис. 4.37 – Схеми пуску однофазних двигунів:

- a)* – з конденсатором або активним опором в колі пускової обмотки; *б)* – з малим індуктивним опором пускової обмотки при напрузі 220 В, *в)* – при напрузі 127 В

Таким чином, якщо однофазний асинхронний двигун після закінчення процесу пуску працює з пульсуючою МРС статора, то конденсаторний двигун – з тією, що обертається. Тому конденсаторні двигуни за своїми властивостями наближаються до трифазних двигунів.

Ємність, необхідна для отримання обертового кругового поля

$$C_{роб} = 1,6 \cdot 10^5 I_A \frac{\sin \varphi_A}{f_1 U_A k^2}, \quad (4.85)$$

при цьому відношення напруги на головній U_A і на допоміжній U_B обмотках повинно бути

$$\frac{U_A}{U_B} = \operatorname{tg} \varphi_A \neq 1,$$

де φ_A – кут зсуву фаз між струмом I_A і напругою U_A при круговому полі;

$k = \frac{W_B k_B}{W_A k_A}$ – коефіцієнт трансформації, що є відношенням

ефективних чисел витків допоміжної і головної обмоток;

k_A і k_B – обмотувальні коефіцієнти обмоток статора.

Аналіз (4.85) показує, що при заданих коефіцієнті трансформації

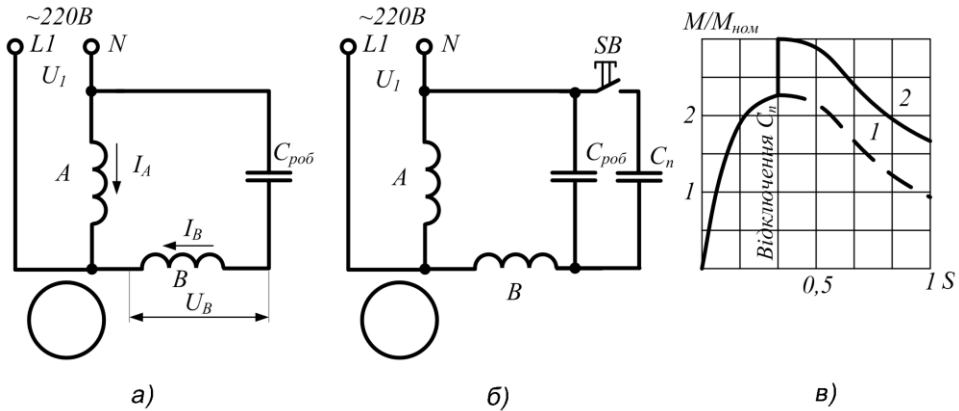
k і відношенні напруги $\frac{U_A}{U_B}$ ємність $C_{роб}$ забезпечує отримання

кругового поля, що обертається, лише при одному, певному режимі роботи двигуна. Якщо ж зміниться режим (навантаження), то зміняться і струм I_A і фазовий кут φ_A , а отже, і $C_{роб}$, відповідна круговому полю.

Таким чином, якщо навантаження двигуна відрізняється від розрахункового, то поле двигуна, що обертається, стає еліптичним і робочі властивості двигуна погіршуються. Зазвичай розрахунок $C_{роб}$ ведуть для номінального навантаження або близького до нього.

Володіючи порівняно високими ККД і коефіцієнтом потужності ($\cos \varphi_1 = 0,80-0,95$), конденсаторні двигуни мають незадовільні пускові властивості, оскільки ємність $C_{роб}$ забезпечує кругове поле лише при розрахунковому навантаженні, а при пуску двигуна поле статора еліптичне. При цьому пусковий момент зазвичай не перевищує $0,5M_{ном}$. Для підвищення пускового моменту паралельно ємності $C_{роб}$ включають ємність $C_{пуск}$, що називається пусковою (рис. 4.38, б). Величину $C_{пуск}$ вибирають, виходячи з умови отримання кругового поля статора при пуску двигуна, тобто отримання найбільшого пускового моменту. Після закінчення пуску ємність $C_{пуск}$ слід відключити, оскільки при невеликих ковзаннях в колі обмотки статора, що

містить ємність C і індуктивність, L – можливий резонанс напруги, через що напруга на обмотці і на конденсаторі може в 2–3 рази перевищити напругу мережі.



1 – при робочій ємності; 2 – при робочій і пусковій ємностях

Рис. 4.38 – Конденсаторний двигун: а) – з робочою ємністю; б) – з робочою і пусковою ємностями; в) – механічні характеристики

При виборі типу конденсатора слід пам'ятати, що його робоча напруга визначається амплітудним значенням синусоїдальної напруги, прикладеної до конденсатора U_m . При круговому полі, що обертається, цю напругу (U_B) перевищує напруга мережі U_1 і визначається виразом

$$U_i = U_1 \sqrt{1 + k^2} \quad (4.86)$$

Конденсаторні двигуни інколи називають двофазними, оскільки обмотка статора цього двигуна містить дві фази. Двофазні двигуни можуть працювати і без конденсатора або другого ФЕ, якщо до фаз обмотки статора підвести двофазну систему напруги (дві напруги, однакові за значенням і частотою, але зсунуті по фазі відносно одна одної на 90°).

Для отримання двофазної системи напруги можна скористатися трифазною лінією з нульовим проводом, включивши обмотки статора так, як показано на рисунку 4.39, а: одну обмотку – на лінійну напругу

U_{AB} , а іншу – на фазну напругу U_m через автотрансформатор АТ (для вирівнювання значення напруги на фазних обмотках двигуна).

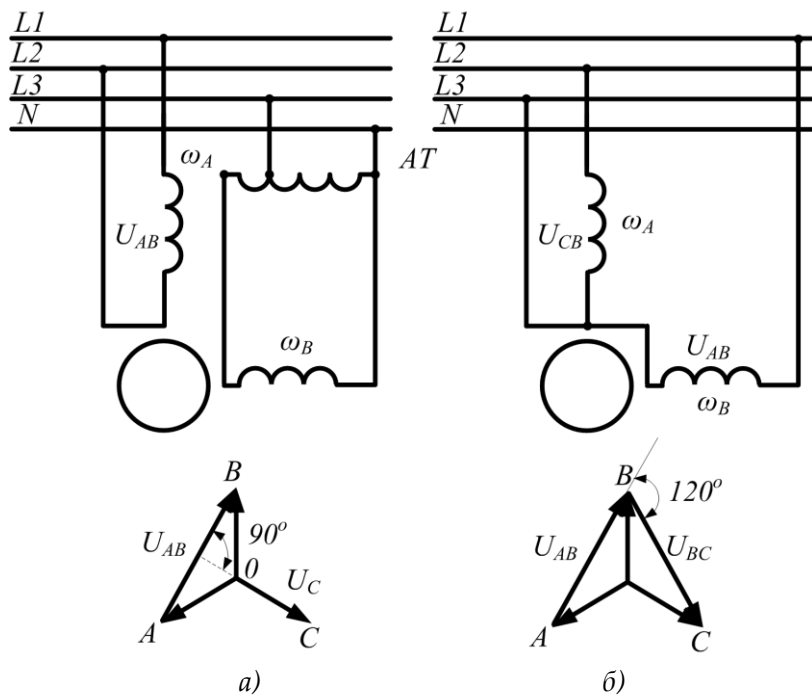


Рис. 4.39 – Схеми включення двофазного двигуна в трифазну мережу

Можливе включення двигуна і без нульового проводу (рис.4.39, б), але в цьому випадку напруги на обмотках двигуна будуть зсунуті по фазі на 120° , що приведе до деякого погіршення робочих властивостей двигуна.

Використання трифазних асинхронних двигунів під час живлення від однофазної мережі: схеми пуску, вибір пускових опорів і ємностей конденсаторів

За необхідності в якості однофазного двигуна може бути використаний трифазний. Такий двигун пускають в хід за схемами, наведеними на рисунку 4.40.

Величину пускового опору R визначають за формулами

$$R = \frac{U_{\phi}}{k_i I_n} \quad (4.87)$$

та

$$R = \frac{3U_{\phi}}{2k_i I_n} \quad (4.88)$$

де R – величина опору (Ом);

U_{ϕ} – фазна напруга (В);

$k_i = \frac{I_n}{I_n} - 4 - 7$ береться з каталогів;

I_n – номінальний струм двигуна (А).

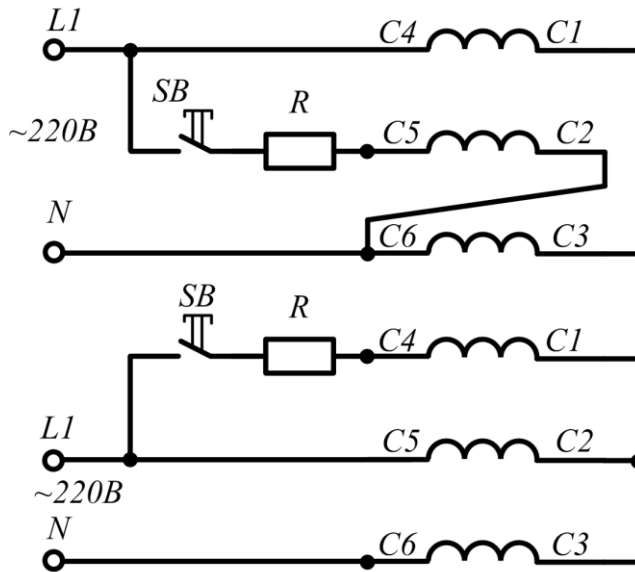


Рис. 4.40 – Схеми пуску трифазних двигунів в однофазному режимі

Трифазний двигун при роботі в однофазному режимі розвиває потужність близько $0,5 P_n$, а якщо напруга, що підводиться до двигуна, буде дорівнювати $2U_{\phi}$, то близько $\frac{2}{3} P_n$ трифазного двигуна.

Замість опору можна включити також і конденсатор, але зважаючи на дорожнечу і дефіцитність конденсаторів, їх для цієї мети використовують не так часто.

Трифазний асинхронний двигун може бути використаний для роботи від однофазної мережі. В цьому випадку такий двигун включають як конденсаторний за одною із схем (рис. 4.41).

Значення робочої ємності $C_{роб}$ (мкФ) при частоті змінного струму 50 Гц можна орієнтовано визначити за однією з формул: для схеми, показаної на рисунку 4.41, а,

$$C_{роб} \approx 2700 \frac{I_1}{U_{\text{м}}}; \quad (4.89)$$

на рисунку 4.41, б

$$C_{роб} \approx 2800 \frac{I_1}{U_{\text{м}}}; \quad (4.90)$$

на рисунку 4.41, в

$$C_{роб} \approx 4800 \frac{I_1}{U_{\text{м}}}; \quad (4.91)$$

де I_1 – номінальний (фазний) струм в обмотці статора, А;

$U_{\text{м}}$ – 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.

Якщо пуск двигуна відбувається при значному навантаженні на валу, то паралельно робочій ємності $C_{роб}$ слід включити пускову ємність

$$C_n = (2,5 - 3,0) C_{роб} \quad (4.92)$$

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

Велике значення для надійної роботи асинхронного двигуна в якості конденсаторного має правильний вибір конденсатора за напругою. Слід мати на увазі, що габарити і вартість конденсаторів визначаються не лише їх ємністю, але і робочою напругою. Тому вибір конденсатора з великим “запасом” за напругою веде до невиправданого збільшення габаритів і вартості установки, а включення конденсаторів на напругу, що перевищує допустиму робочу напругу, приводить до передчасного виходу з ладу конденсаторів, а отже, і всієї установки.

При визначенні напруги на конденсаторі при включенні двигуна за однією з розглянутих схем необхідно мати на увазі наступне: при включенні двигуна за схемою (рис. 4.41, а) напруга на конденсаторі дорівнює $U_k \approx 1,3U_m$, а при включенні двигуна за схемами рисунок 4.41, б, ця напруга дорівнює $U_k \approx 1,15U_m$.

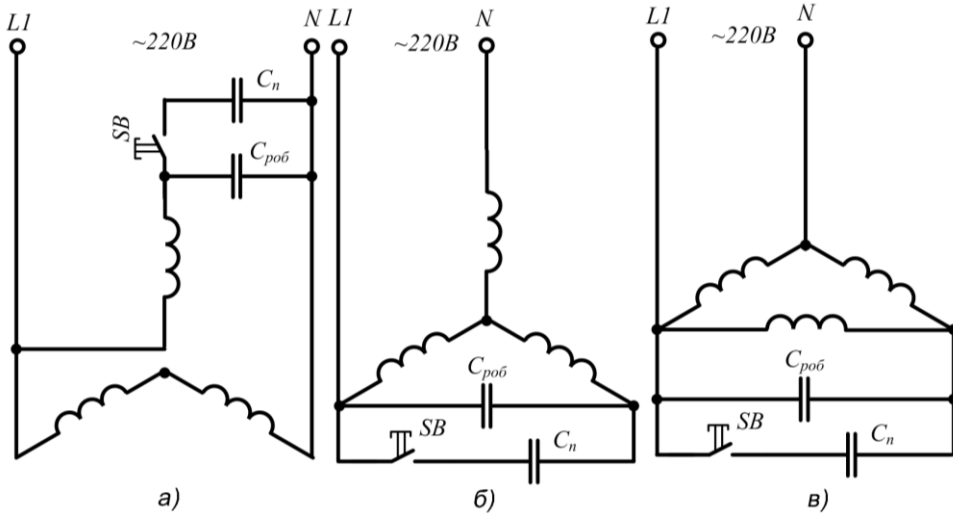


Рис. 4.41 – Схеми з'єднання обмотки статора трифазного асинхронного двигуна при включенні його в однофазну мережу

У схемах конденсаторних двигунів зазвичай застосовують паперові конденсатори в металевому герметичному корпусі прямокутної форми типів КБГ – МН або БГТ (термостійкі). На корпусі конденсатора вказані ємність і робоча напруга постійного струму. При включенні такого конденсатора в мережу змінного струму слід зменшити приблизно в два рази допустиму робочу напругу. Наприклад, якщо на конденсаторі вказана напруга 600 В, то робочу напругу змінного струму слід рахувати 300 В.

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

4.6 АСИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ

Принцип дії і схеми вмикання асинхронних генераторів із збудженням від мережі і з конденсаторним збудженням

Якщо статор асинхронної трифазної машини підключений до мережі трифазного змінного струму, то в ньому утворюється магнітне поле, що обертається.

Якщо ротор цієї асинхронної машини обертати первинним двигуном в напрямі обертового магнітного поля статора із швидкістю n_2 , більшою на 3–5 %, ніж швидкість магнітного поля статора n_1 , то така машина працюватиме в режимі асинхронного генератора, оскільки до неї підводиться механічна енергія, яка перетворюється в електричну. Ковзання ротора буде негативним

$$-s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{так як} \quad n_2 > n_1$$

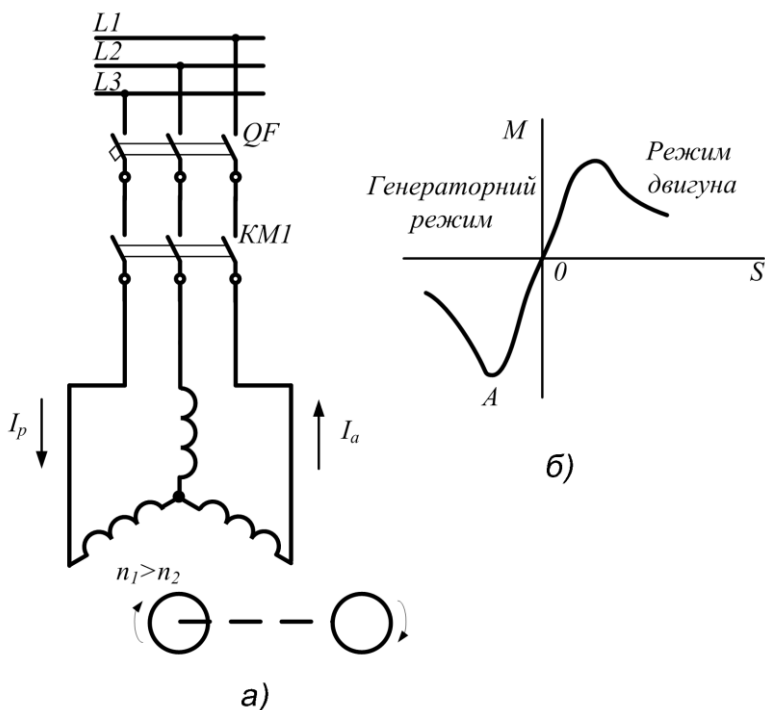


Рис. 4.42 – Асинхронний генератор із збудженням від мережі: а) – схема, б) – криві $M = f(s)$

Асинхронна машина, що працює в режимі генератора, споживає реактивну енергію з мережі для створення магнітного поля, що обертається, а активну віддає в мережу (рис. 4.42, а). Крива залежності моменту від ковзання показує роботу асинхронної машини в режимі двигуна і генератора (рис. 4.42, б). Ділянка кривої OA показує область стійкої роботи генератора, коли із збільшенням ковзання зростатиме момент, що прикладається до валу машини. За точкою A настає область нестійкої роботи генератора, коли із збільшенням швидкості момент і потужність генератора зменшуються.

Асинхронну машину в режимі генератора часто використовують в електричних стендах для обкатки і випробування автотракторних двигунів, наприклад, в стенді СТЭУ-28-ГОСНИТИ.

На стенді асинхронна машина працює в двох режимах: як електродвигун для холодної обкатки автотракторних двигунів і як асинхронний генератор при гарячій обкатці автотракторних двигунів, причому вона є електрогальмом, а електроенергія, що виробляється нею, віддається на мережу.

Асинхронна машина в режимі генератора може працювати і без збудження від мережі змінного струму. Для цього до затисків статора приєднують батарею конденсаторів, а ротор асинхронної машини обертають із швидкістю n_2 на 3–5 % більшою її синхронної швидкості (рис. 4.43, а).

В цьому випадку асинхронний генератор самозбуджується від магнітного потоку залишкового магнетизму в сталі ротора. При обертанні ротора його магнітний потік пересікає витки обмотки статора і індукуює в них ЕРС (рис. 4.43, б), що відстає від потоку $\Phi_{\text{зал}}$ на 90° .

Наявність ЕРС зумовить струм статора I_c на конденсатори, який, як ємнісний струм, випереджатиме ЕРС $E_{\text{зал}}$ на 90° . Струм I_c створює в машині магнітний потік Φ_c , який, поєднуючись з магнітним потоком залишкового магнетизму, збільшує ЕРС $E_{\text{зал}}$, що викликає збільшення струму I_c і подальше зростання ЕРС, величина якої досягає приблизно номінальної напруги асинхронної машини. Межа збільшення напруги при самозбудженні залежить від міри насичення сталі машини і опору обмоток статора.

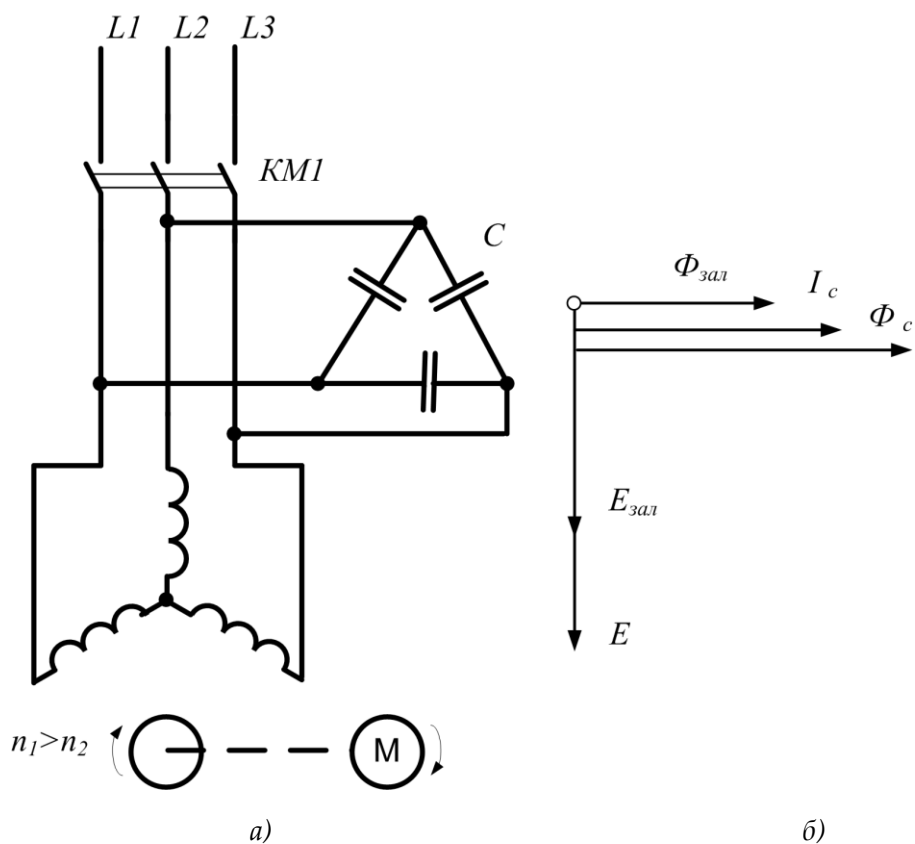


Рис. 4.43 – Асинхронний генератор з конденсаторним збудженням а) – схема, б) – векторна діаграма

При зміні обертів змінюються частота і напруга генератора. Напругу генератора регулюють зміною обертів ротора або ємності конденсаторів.

До асинхронного генератора із збудженням від конденсаторів може бути підключене лише активне навантаження. При необхідності підключення індуктивного навантаження потрібно відповідно збільшувати ємність конденсаторів.

Унаслідок високої вартості конденсаторів і складності регулювання напруги ці генератори розповсюдження не набули.

Переваги, недоліки і застосування асинхронних генераторів

Асинхронні генератори не потрібно синхронізувати з мережею. Частота струму, що виробляється асинхронним генератором, і його напруга визначаються величинами напруги і частоти в мережі і не залежать від числа обертів ротора генератора.

Оскільки асинхронний генератор споживає реактивну енергію з мережі, то він сильно погіршує коефіцієнт потужності в мережі, що є його найбільшим недоліком.

4.7 ІНДУКЦІЙНІ РЕГУЛЯТОРИ І ФАЗОРЕГУЛЯТОРИ

Трифазний індукційний регулятор, однофазний регулятор: схеми, принцип дії, переваги і недоліки, застосування

Електропромисловість випускає індукційні регулятори, які є загальмованими асинхронними двигунами з фазним ротором.

Нерухома обмотка статора є прохідною, по ній проходить струм навантаження, а обмотку ротора, яку можна повертати черв'ячною передачею, підключають до мережі (рис. 4.44, а). Оскільки в трифазній обмотці ротора проходить трифазний змінний струм, то в ній індукуює магнітний потік Φ , що обертається, який, пересікаючи витки обмоток статора і ротора, індукуює в них відповідно ЕРС E_1 та E_2 .

Напруга на виході індукційного регулятора U_2 дорівнює геометричній сумі напруги мережі U_1 і ЕРС статора E_1 (рис. 4.44, б).

$$\vec{U}_2 = \vec{U}_1 + \vec{E}_1 \quad (4.93)$$

Оскільки всі три фази знаходяться в однакових умовах, то для спрощення накреслимо векторну діаграму напруги лише для однієї фази.

Якщо осі обмоток збігаються в просторі, то магнітний потік Φ , що обертається, одночасно набігає на обмотки статора і ротора і індукуює в них ЕРС, що співпадають по фазі, тобто направлені в один бік. Тоді напруга на виході U_2 дорівнюватиме максимальному значенню $U_{2\text{мак}}$ (рис. 4.44, б).

Обернувши ротор на 180 електричних градусів, набудемо мінімального значення напруги на виході $U_{2\min}$. При повороті ротора на α електричних градусів напруга на виході U_2 дорівнює геометричній сумі векторів $OA = U_1$ і $AB = E_1$. Геометричним мостом кінців векторів ЕРС E_1 і напруги U_2 є коло, описане з точки A як з центру радіусом AB .

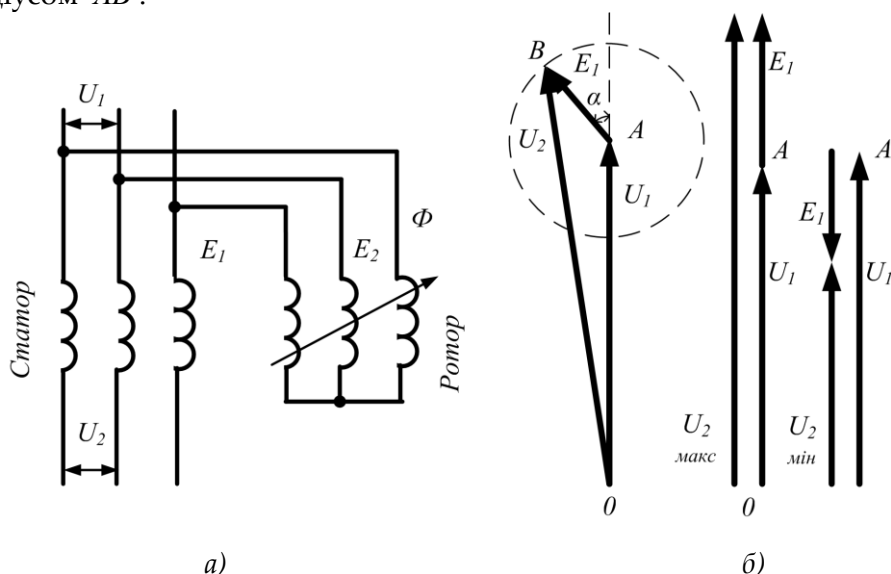


Рис. 4.44 – Трифазний індукційний регулятор: а) – схема; б) – векторні діаграми напруги

Ротор повертають черв'ячною передачею тому, що при роботі індукційного регулятора до ротора прикладений великий момент, що обертається, а черв'ячна передача служить і для повороту, і для гальмування ротора.

Оскільки вектор напруги U_2 зсувається по фазі відносно вектора напруги мережі U_1 , індукційний регулятор не може працювати паралельно з трансформатором.

Графік зміни напруги на виході індукційного регулятора U_2 залежно від кута α представлений на рисунку 4.45.

Індукційні регулятори застосовують в мережах для регулювання напруги під навантаженням. Для цієї мети їх випускають як з низькою, так і з високою напругою до 10 кВ потужністю понад 1000 кВА (тип МА-195). Індукційні регулятори типу АИ-61 і АИ-62 випускають на

низьку напругу потужністю до 100 кВА. Застосовують їх переважно в лабораторіях і в схемах автоматики для плавного регулювання напруги.

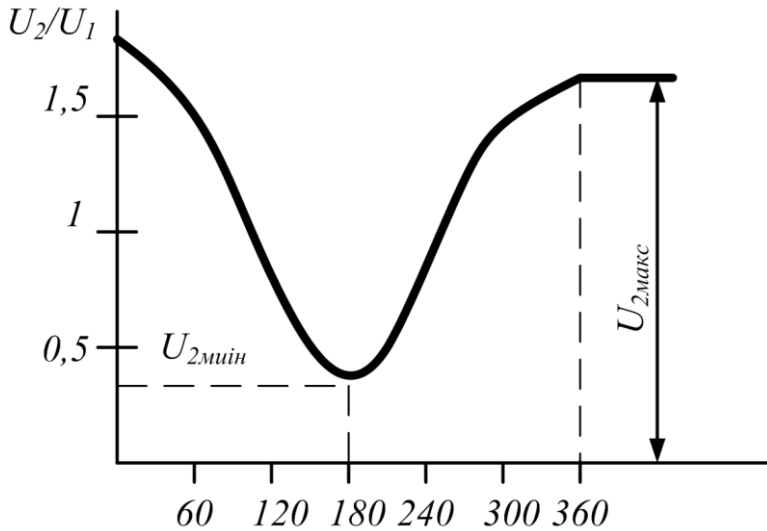


Рис. 4.45 – Графік зміни напруги на виході трифазного регулятора U_2 залежно від кута обертання ротора α

Ротор повертають або вручну від маховика, насадженого на вал черв'яка, або електродвигуном.

У практиці часто зустрічаються індукційні регулятори, виготовлені з асинхронних двигунів з фазним ротором. Вони відрізняються від заводських тим, що у них обмотку ротора використовують як прохідну і з кілець ротора знімають напругу U_2 , а обмотку статора приєднують до мережі (рис. 4.46). Принцип дії цього індукційного регулятора не відрізняється від принципу дії заводського.

Однофазні індукційні регулятори зустрічаються рідше, ніж трифазні.

Однофазний індукційний регулятор – це регульований поворотний автотрансформатор, виконаний із загальмованого асинхронного двигуна.

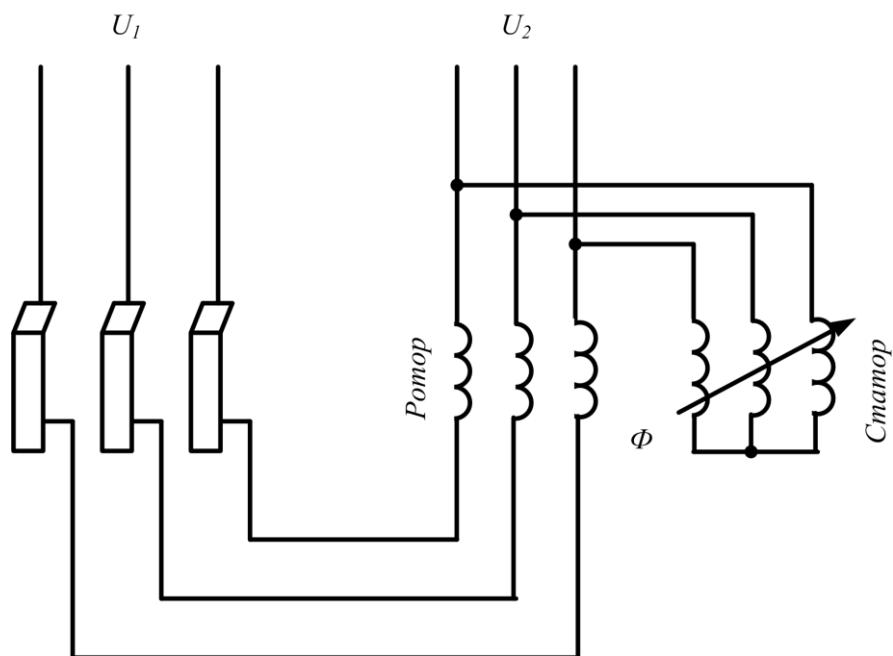


Рис. 4.46 – Схема трифазного індукційного регулятора, що виготовлена із трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором

Первинну однофазну обмотку статора підключають до мережі, а однофазну обмотку ротора можна повертати відносно обмотки статора черв'ячною передачею (рис. 4.47, а). У первинній обмотці статора створюється пульсуючий магнітний потік Φ_1 , який пронизує і обмотку ротора. При повороті ротора змінюється величина магнітного потоку Φ_2 , що пронизує його обмотку, пропорційно $\cos \Theta$,

$$\Phi_2 = \Phi_1 \cos \Theta \quad (4.94)$$

Величина напруги на виході однофазного індукційного регулятора U_2 дорівнює сумі напруги мережі U_1 і ЕРС, індукованої в обмотці ротора E_2

$$U_2 = U_1 + E_2 \quad (4.95)$$

Оскільки величина ЕРС E_2 залежить від величини магнітного потоку Φ_2 , що пронизує обмотку ротора, то напруга на виході

змінюватиметься від максимального значення $U_{2\text{мак}}$, коли кут $\Theta = 0^\circ$, до мінімального, коли кут $\Theta = 180^\circ$.

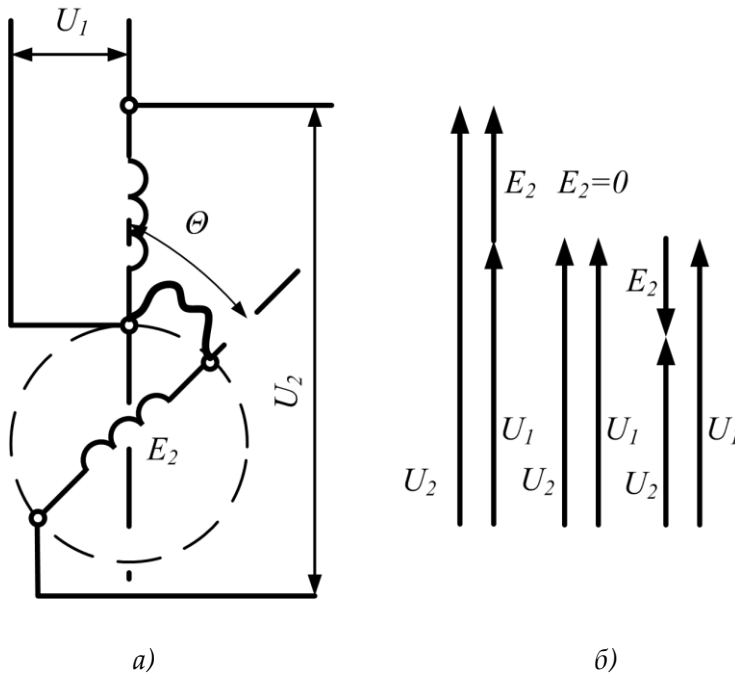


Рис. 4.47 – Однофазний індукційний регулятор: а) – схема, б) – векторні діаграми напруг

При куті $\Theta = 90^\circ$ напруга на виході U_2 дорівнює напрузі мережі U_1 , оскільки $\cos 90^\circ = 0$ (рис. 4.47, б). У однофазному індукційному регуляторі при повороті ротора змінюється лише величина ЕРС E_2 , але вектор ЕРС E_2 не зсувається по фазі відносно напруги мережі, тому вектор напруги U_2 збігається по фазі з вектором напруги мережі U_1 .

Фазорегулятори: схеми, принцип дії, застосування

Фазорегулятор є асинхронною трифазною машиною з ротором, загальмованим черв'ячною передачею. На відміну від індукційного регулятора обмотки статора і ротора електрично між собою не з'єднані (рис. 4.48).

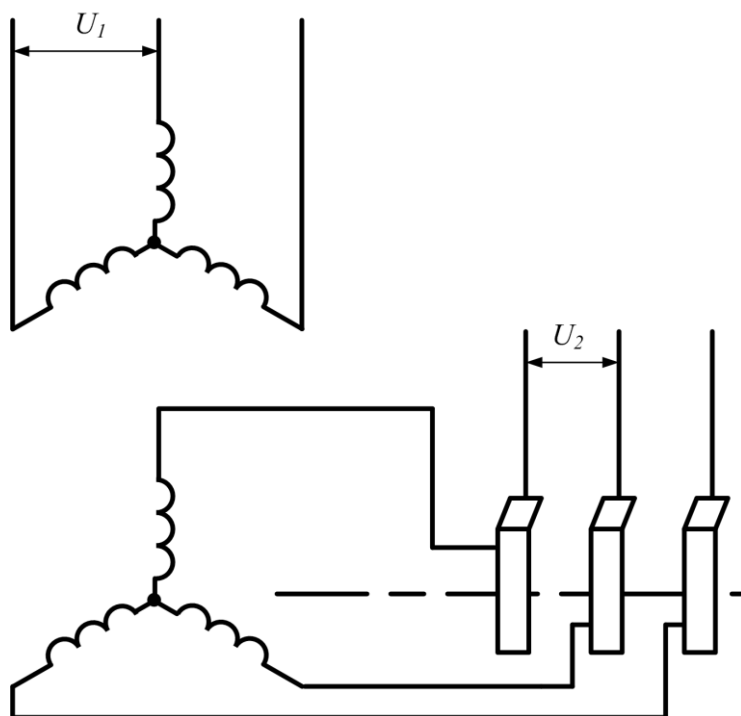


Рис. 4.48 – Схема фазорегулятора

До обмотки статора підводять напругу мережі, а з кілець обмотки ротора знімають напругу U_2 .

При повороті ротора змінюється лише фаза вторинної напруги U_2 , а величина його весь час залишається постійною.

Фазорегулятори застосовують в автоматиці і у вимірювальній техніці, наприклад, в стендах для перевірки електричних лічильників.

Електропромисловістю випускаються фазорегулятори трифазні типів ФР і ФРО потужністю від 1 до 15 кВА.

У фазорегуляторі типу ФР потужністю 1 кВА ротор повертають від руки, а у фазорегуляторах типу ФРО (фазорегулятор обдуваний) потужністю 7,5 і 15 кВА – електродвигуном, що дає можливість дистанційно управляти ними.

4.8 ОБЕРТОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Електромашинні перетворювачі, двигун генераторного типу, перетворювачі постійно-змінного і постійного струмів: конструкція, принцип дії, пуск в хід, регулювання напруги на виході

Для перетворення змінного струму в постійний або навпаки іноді застосовують обертові перетворювачі. Найпоширенішим обертовим перетворювачем є двигун-генератор, який зазвичай застосовують для перетворення змінного струму в постійний.

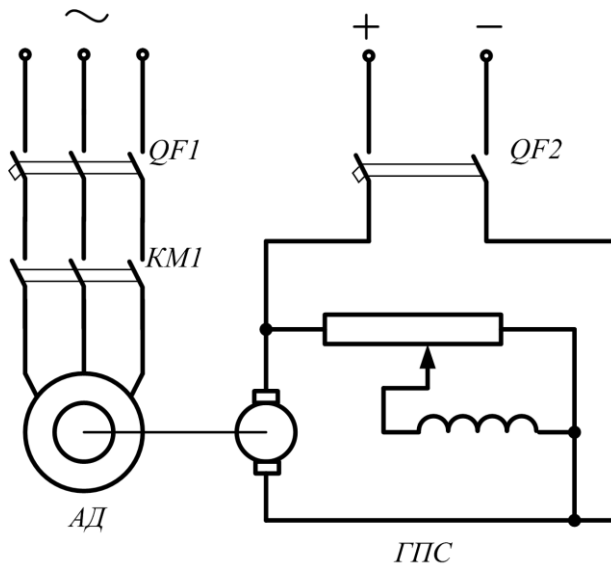


Рис. 4.49 – Схема двигуна-генератора

В якості двигуна використовують синхронний або асинхронний двигун *АД*, а як генератор – машину постійного струму *ГПС*, які з'єднують зазвичай муфтою на одному валу при суміщенні їх обертів. Двигун і генератор електрично між собою не з'єднані (рис. 4.49).

Коефіцієнт корисної дії агрегату дорівнює добутку ККД двигуна на ККД генератора

$$\eta_{agr} = \eta_{дв} \eta_{ген} \quad (4.96)$$

Тому ККД двигуна-генератора відносно низький.

До недоліків двигунів-генераторів слід віднести також їх високу вартість і завищені габарити, так як в агрегаті потрібно встановлювати дві електричні машини.

До переваг двигунів-генераторів відносяться надійність в роботі, простота обслуговування і можливість широкого і плавного регулювання напруги перетворюваного струму.

В ремонтних майстернях двигуни-генератори застосовують як зарядні агрегати для зарядки акумуляторів.

Електропромисловість випускає велику кількість двигунів-генераторів, які застосовують у промисловості.

Обертові перетворювачі частоти И-75, принцип дії, схеми, номінальні величини

Розглянемо принцип дії асинхронного перетворювача частоти струму типу И-75, що застосовується для електроприводу стригальних машинок для овець.

Перетворювач складається з двополюсного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором і шестиполюсного асинхронного генератора (перетворювача) з фазним ротором.

Ротори обох машин мають загальний вал, а статори поміщені в загальному корпусі.

Обмотки статорів асинхронного двигуна і генератора живляться струмом частотою 50 Гц при напрузі 380/220 В. Схема включення обмоток статорів виконана таким чином, щоб обертання магнітних полів двигуна і генератора були протилежні один одному.

Споживачів приєднують до фазної обмотки ротора генератора через кільця та щітки (рис. 4.50). Напрята на кільцях 36 В, частота струму 200 Гц.

Двигун обертає ротор генератора проти напрямку обертання магнітного поля його статора, внаслідок чого в обмотці ротора генератора наводиться ЕРС з частотою, що визначається за формулою

$$f_2 = f_1 \frac{n_1 + n_2}{n_2}, \quad (4.97)$$

де f_2 – частота ЕРС в роторі генератора;

f_1 – частота мережі;

n_1 – число обертів ротора генератора в хвилину;

n_2 – число обертів обертового магнітного поля статора генератора в хвилину.

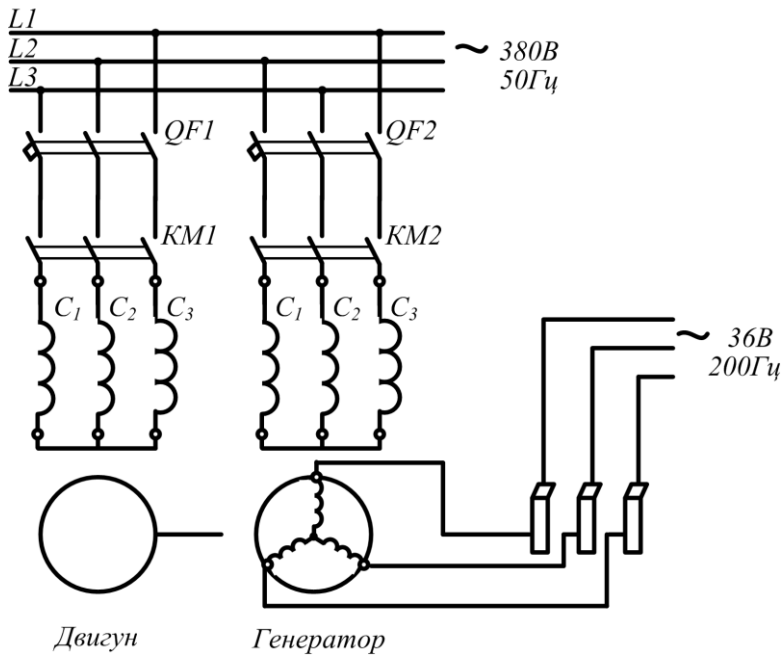


Рис. 4.50 – Схема перетворювача частоти струму типу И-75

При частоті мережі 50 Гц число обертів ротора генератора, що приводиться в рух двополюсним асинхронним двигуном, дорівнює 2800 об/хв. Нехтуючи ковзанням ротора, прийнемо число обертів ротора генератора, рівним синхронному, тобто 3000 об/хв. Число обертів обертового магнітного поля статора генератора при шести полюсах дорівнює 1000 об/хв. Тоді частота струму в роторі генератора дорівнюватиме

$$f_2 = f_1 \frac{n_1 + n_2}{n_2} = 50 \frac{3000 + 1000}{1000} = 200 \text{ Гц}$$

Підвищення частоти до 200 Гц дає можливість застосувати для приводу стригальних машинок швидкохідні електродвигуни з числом обертів 12 000 в хвилину напругою 36 В.

Завдяки застосуванню швидкохідного електродвигуна вага стригальної машинки з електродвигуном знижена до 1,75 кг, а зниження напруги до 36 В забезпечує безпеку роботи обслуговуючого персоналу.

4.9 АСИНХРОННІ МІКРОМАШИНИ

Однофазні асинхронні двигуни з розщепленими полюсами: будова, принцип дії, основні експлуатаційні властивості, застосування

Для створення пускового моменту в асинхронних двигунах малої потужності застосовують конструкцію з явно вираженими екранованими полюсами (рис. 4.51, а), на яких розташовують однофазну обмотку. Полюси 1 мають розщеплену на дві частини конструкцію, при цьому на одну з частин кожного полюса надітий короткозамкнений виток (екран) у вигляді мідного кільця 2. Ротор двигуна короткозамкнений.

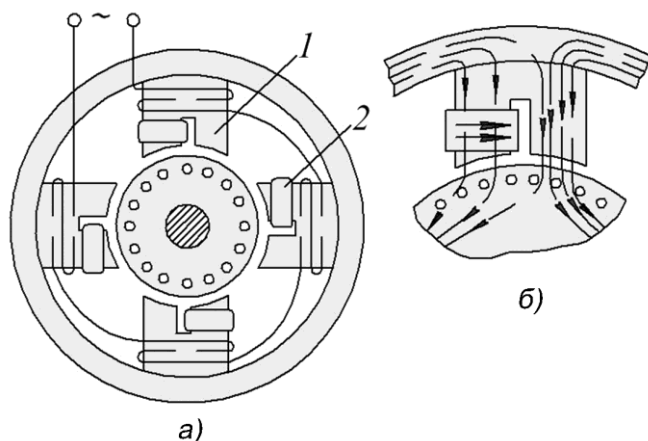


Рис. 4.51 – Асинхронний електродвигун з екранованими полюсами

При включенні обмотки статора в мережу пульсуючий потік наводить у короткозамкнутому витку (екрані) струм, що перешкоджає наростанню магнітного потоку і викликає фазовий зсув потоку в цій частині полюса (рис. 4.51, б). У результаті потоки в обох частинах кожного полюса виявляються зсунутими по фазі відносно один одного, що, в свою чергу, призводить до утворення в двигуні обертового магнітного поля. Часто для поліпшення пускових і робочих характеристик двигуна між полюсами поміщають магнітні шунти у вигляді сталевих пластин, що замикають краї полюсних наконечників полюсів статора.

Асинхронні двигуни з екранованими полюсами нереверсивні – ротор завжди обертається в напрямку від неекранованої частини полюса до екранованої. Зазвичай ці двигуни виготовляють потужністю не більше 100 Вт і застосовують для приводу пристроїв, що не вимагають великого пускового моменту (електропривод вентиляторів, електропрогрівачів тощо). Вітчизняною промисловістю виготовляються асинхронні двигуни з екранованими полюсами серії АД...Е, призначені для приводу приладів з вентиляторним навантаженням. Ці двигуни потужністю від 2,5 до 25 Вт розраховані на роботу від мережі напругою 220 В частотою 50 Гц. Кратність пускового моменту цих двигунів складає ($M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 0,5 - 0,6$).

Асинхронні виконавчі двигуни: принцип дії, схеми керування, основні експлуатаційні властивості, застосування

Асинхронні виконавчі двигуни широко застосовуються в системах автоматичного керування. Це асинхронні двигуни невеликої потужності (0,1–300 Вт) з двофазною обмоткою статора і короткозамкненим ротором (рис. 4.52). Одна з обмоток статора називається обмоткою збудження (З) і знаходиться під постійною напругою U_z , а друга називається обмоткою керування (К) і живиться напругою U_k , величина (рис. 4.52, а і б) чи фаза (рис. 4.52, в) якого змінюються під дією керуючого сигналу. У першому випадку керування називається амплітудним, а в другому – фазовим. В обох випадках напруги U_z і U_k зміщені по фазі, в результаті чого двигун здатний розвивати обертальний момент.

Зазвичай до виконавчих двигунів висуваються наступні вимоги:

- 1) відсутність самоходу, тобто необхідність самогальмування і зупинки двигуна при знятті напруги керування U_k ;
- 2) стійка робота у всьому діапазоні швидкостей обертання;
- 3) зміна швидкості обертання в широкому діапазоні при зміні величини або фази напруги керування;
- 4) близькі до лінійних механічні ($M = f(n)$ при $U_k = \text{const}$) і регульовальні ($n = f(U_k)$ при $M = \text{const}$) характеристики;
- 5) велика величина пускового моменту;
- 6) мала потужність керування;

- 7) швидкодія;
- 8) надійність у роботі;
- 9) малі габарити і вага.

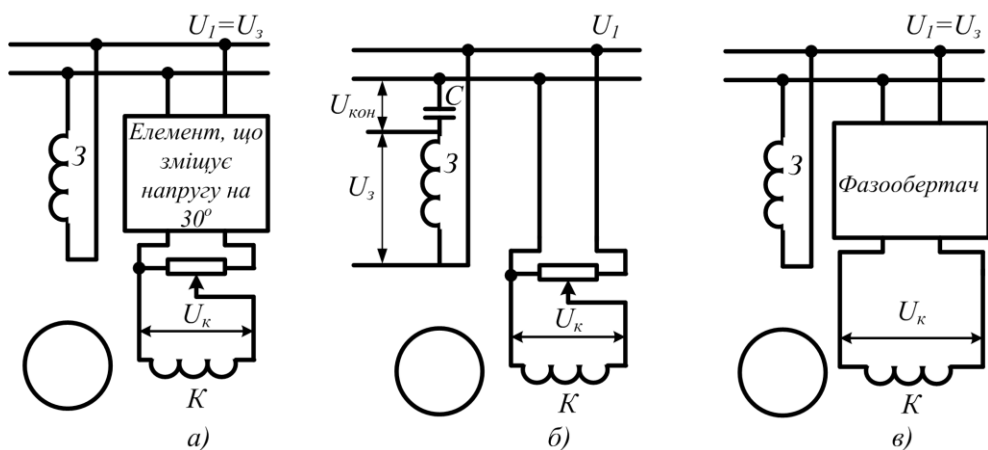


Рис. 4.52 – Схеми включення асинхронних виконавчих електродвигунів

Виконавчі двигуни будуються з таким розрахунком, що кругове обертове поле в них виникає тільки при пуску. Це сприяє отриманню великого пускового моменту. Відсутність самоходу, стійка робота і лінійність характеристик досягаються вибором активного опору ротора настільки великим, що критичне ковзання $s_m = 3-4$. За цих умов криві моментів прямої послідовності M_1 , і зворотної послідовності M_2 мають вигляд, зображений на рисунку 4.53.

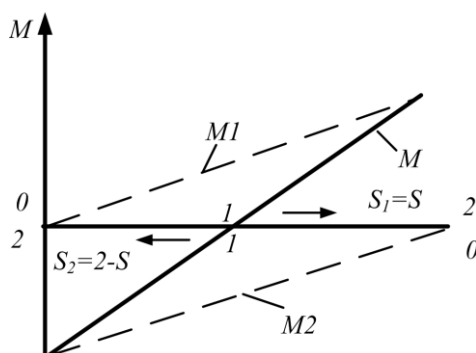


Рис. 4.53 – Криві обертових моментів виконавчого двигуна при $U_y = 0$

З рисунку видно, що при знятті напруги керування, коли струми прямої і зворотної послідовності рівні, результуючий момент $M = M_1 + M_2$ у робочому діапазоні ковзань ($0 < s < 1$) стає негативним, і тому при $U_y = 0$ ротор виконавчого двигуна, на відміну від нормального двигуна при роботі в однофазному режимі, зупиняється. Разом з тим, збільшення опору ротора виконавчого двигуна призводить до зниження його номінальної потужності при тих же габаритах в два-три рази.

Вид механічних і регулюючих характеристик асинхронних виконавчих двигунів при амплітудному керуванні зображений на рисунку 4.54.

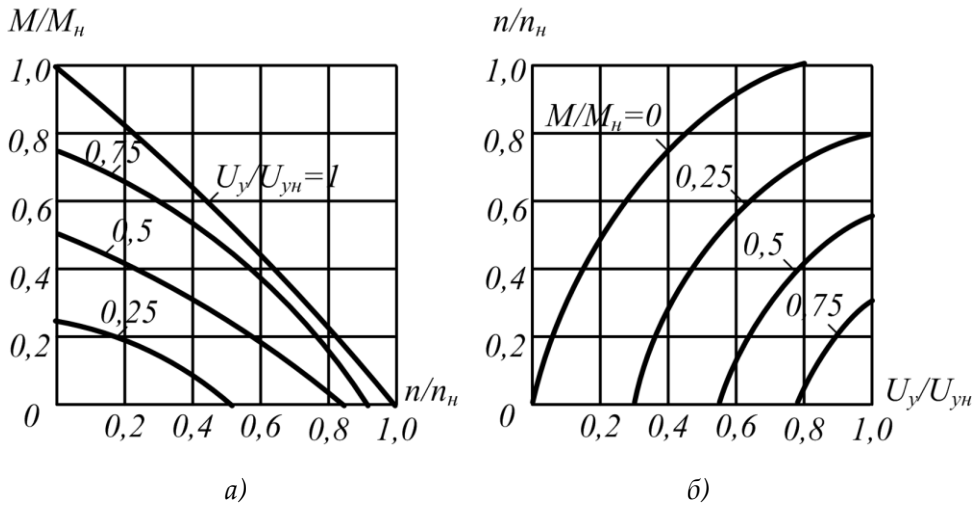
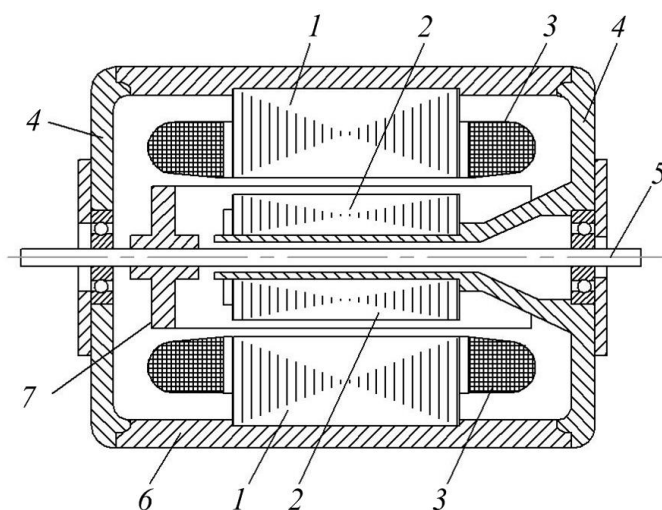


Рис. 4.54 – Вид механічних (а) і регулювальних (б) характеристик асинхронного виконавчого двигуна при амплітудному керуванні

Асинхронні виконавчі двигуни мають такі різновиди конструкції ротора: 1) з обмоткою у вигляді білячої клітки, 2) порожнистий немагнітний ротор і 3) порожнистий феромагнітний ротор. Двигун з порожнистим немагнітним ротором (рис. 4.55) має зовнішній і внутрішній статори з листової електротехнічної сталі, між якими обертається тонкостінний (0,1–0,2 мм) ротор з алюмінієвого сплаву, що має форму стаканчика. Двофазна обмотка звичайно розташовується на зовнішньому статорі. Двигун з порожнистим феромагнітним ротором не має внутрішнього статора, так як роль магнітопроводу

виконує сам ротор. Для поліпшення технічних показників двигуна іноді зовнішню циліндричну поверхню феромагнітного ротора або його днища (торцеві пробки) покривають міддю.

Двигуни з порожнистим немагнітним ротором мають малу механічну інерцію і тому мають більшу швидкодію. Однак величина немагнітного зазору магнітного кола, між зовнішнім і внутрішнім статорами, у них виходить велика (0,5–1,5 мм), що призводить до зменшення ККД і коефіцієнта потужності і до збільшення габаритів і ваги. Через останні два фактори у ряді випадків перевага цих двигунів у швидкодії втрачається. Ці двигуни також менш надійні в роботі, ніж двигуни з білячою кліткою.



- 1 – зовнішній статор; 2 – внутрішній статор; 3 – обмотка,
4 – підшипникові щити; 5 – вал; 6 – корпус;
7 – порожнистий ротор

Рис. 4.55 – Будова асинхронного виконавчого двигуна з порожнистим немагнітним ротором

Двигуни з порожнистим феромагнітним ротором мають дуже великий активний опір ротора, і тому їх ККД ще нижче, ніж у двигунів з порожнистим немагнітним ротором.

Найчастіше застосовуються двигуни з білячою кліткою і порожнистим немагнітним ротором. Виконавчі двигуни виготовляються на номінальні частоти 50–1000 Гц. У деяких системах автоматичного керування використовуються керовані двигуни, ротори

яких не обертаються, а лише повертаються в межах деякого невеликого кута. Вплив цих двигунів на керований об'єкт залежить від величини їх обертового моменту, і такі двигуни називаються моментними. Величина їх моменту також залежить від напруги обмотки управління.

Асинхронні тахогенератори: принцип дії, основні експлуатаційні властивості, застосування

Тахогенератори змінного струму можна виконати у вигляді невеликих синхронних генераторів, величина ЕРС яких при постійному потоці збудження пропорційна швидкості обертання. Однак такі тахогенератори мають змінну частоту, що є їх істотним недоліком.

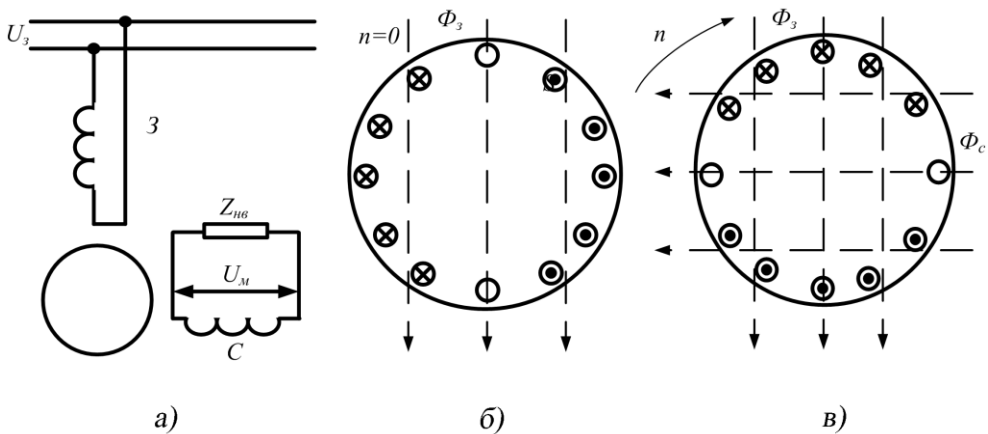


Рис. 4.56 – Схема (а) асинхронного тахогенератора і розподіл у роторі струмів трансформації (б) і обертання (в)

У зв'язку з цим застосовуються асинхронні тахогенератори (рис. 4.56), конструкція яких цілком аналогічна конструкції виконавчого двигуна з порожнистим ротором. Обмотка збудження Z тахогенератора живиться від мережі змінного струму з $f = const$ і створює пульсуючий потік Φ_3 . При нерухомому роторі (рис. 4.56, б) цей потік індукуює в роторі ЕРС трансформації, в результаті чого в роторі виникають струми, які створюють магнітний потік, що діє по осі обмотки збудження. Цей потік з сигнальною обмоткою C не

зчіплюється, так як ця обмотка зміщена щодо обмотки Z на 90° . Тому при $n = 0$ напруга сигнальної обмотки $U_c = 0$. При обертанні ротора в ньому індукуюється також ЕРС обертання, в результаті чого в роторі виникає також інша система струмів (рис. 4.56 в), яка створює потік Φ_c , що зв'язується з сигнальною обмоткою. Цей потік пульсує з частотою струму збудження, величина його пропорційна n , і в обмотці C індукуюється ЕРС $E_c \approx n$. До цієї обмотки приєднується навантаження у вигляді вимірювального приладу або елемента системи автоматичного регулювання.

Сельсини: принцип дії, призначення

Сельсини застосовуються найчастіше для синхронного повороту або обертання двох або кількох осей, не пов'язаних одна з одною механічно, а також для деяких інших цілей. Однофазні сельсини найчастіше мають наступну будову (рис. 4.57). На явно виражених полюсах статора розташована зосереджена обмотка збудження Z , а в пазах циліндричного ротора – три розподілені обмотки синхронізації C , які зміщені відносно одна одної в просторі на 120 градусів. і цілком аналогічні трифазній обмотці нормальної машини змінного струму. Обмотки ротора з'єднуються з зовнішніми колами за допомогою контактних кілець і щіток. Сердечники статора і ротора зібрані з листової електротехнічної сталі. Розглянемо роботу однофазних сельсинів. В індикаторному режимі роботи (рис. 4.57) один сельсин-датчик D керує роботою одного або кількох сельсинів-приймачів P .

Обмотки збудження Z цих сельсинів включаються в загальну мережу, а обмотки синхронізації C з'єднуються одна з одною, як показано на рис. 4.57. Пульсуюче поле збудження індукує ЕРС у "фазах" обмоток синхронізації. Якщо кути повороту відповідних фаз датчика β_o і приймача β_n по відношенню до осей полюсів однакові ($\beta_o = \beta_n$), то ЕРС з'єднаних одна з одною "фаз" обмоток синхронізації також однакові

$$E_{ao} = E_{an} \quad E_{bo} = E_{bn} \quad E_{co} = E_{cn}$$

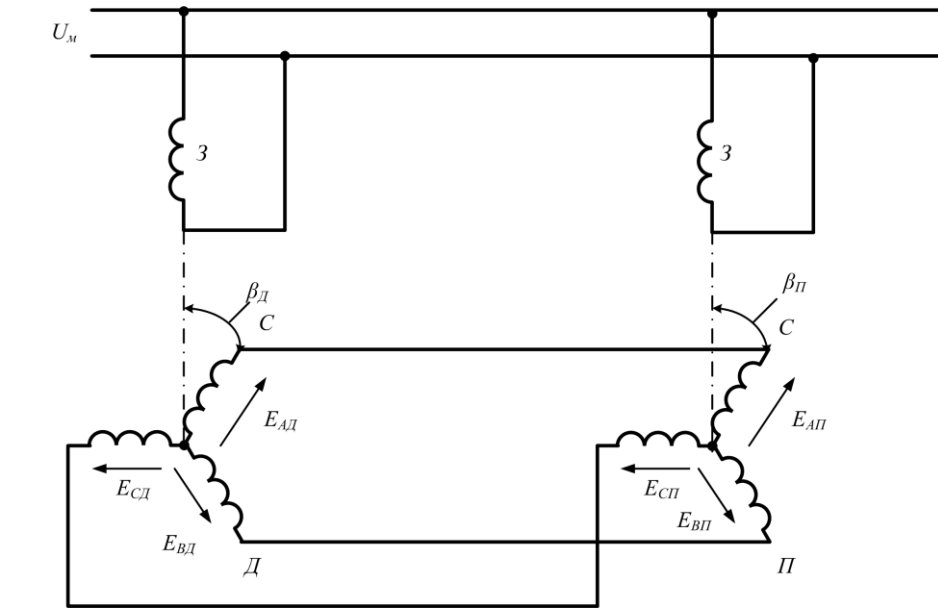


Рис. 4.57 – Схеми включення однофазних сельсинів при індикаторному режимі роботи

і спрямовані зустрічно. При цьому в обмотках синхронізації не виникає жодних струмів і електромагнітні моменти сельсинів дорівнюють нулю. Якщо ж ротори сельсинів будуть займати неоднакове становище і тому так званий кут неузгодженості

$$\Delta\beta = \beta_o - \beta_n$$

не буде дорівнювати нулю, то зазначені вище рівності ЕРС порушаться, в обмотках синхронізації виникнуть струми і на роторі сельсинів будуть діяти електромагнітні моменти M_o і M_n . Більш докладний аналіз цього питання показує, що моменти датчика і приймача мають різні знаки і обидва діють в напрямку зменшення кута неузгодженості $\Delta\beta$. Якби момент опору на валу сельсина-приймача дорівнював нулю, то $\Delta\beta = 0$ і ротор цього сельсина в точності відтворював би рух ротора сельсина-датчика, причому не тільки в режимі повільного повороту ротора, але і при його обертанні з певною швидкістю. У дійсності на ротор сельсина-приймача діють певні, хоч і невеликі гальмівні моменти. Це моменти від тертя в підшипниках, на контактних кільцях і об повітря в сельсині, а також невеликий момент опору механізму, з'єднаного з валом сельсина-

приймача (стрілка або шкала вказівного приладу – індикатора, повзунок невеликого реостата та ін.) Тому завжди існує невелика помилка $\Delta\beta$ в передачі кута. Деяка помилка виникає також в результаті різних неточностей у виготовленні сельсинів, зубчастої будови їх ротора та ін. Сельсини різних класів точності мають максимально допустимі значення кутів неузгодженості (помилки) в межах $0,25\text{--}2,5^\circ$. Максимальний момент сельсинів-приймачів зазвичай знаходиться в межах $200\text{--}2000$ гс·см. Використовуються також інші схеми включення та режими роботи сельсинів.

Безконтактні сельсини (рис. 4.58), запропоновані А.Г. Юсиф'яном і А.Б. Свечарніком у 1938 р., мають ту перевагу, що відсутність ковзаючих щіткових контактів збільшує надійність роботи сельсинів і зменшує їх похибки у вигляді зменшення втрат на тертя. У таких сельсинах обидві обмотки розміщуються на статорі 1, а ротор 3 не має обмоток. Обмотки синхронізації 5 цього сельсина розташовуються на статорі, який за своєю конструкцією аналогічний статору асинхронного двигуна.

Обмотка збудження 2 має вигляд кільцевих коаксіальних котушок, що охоплюють ротор. Особливістю будови ротора є те, що він має немагнітну частину 4, завдяки чому полюси ротора в магнітному відношенні розділені і потік Φ направляється з одного полюса ротора через нерухомий зовнішній магнітопровід 6 в інший полюс ротора і через ротор в статор. У результаті цього при нерухомій обмотці збудження вдається отримати в повітряному зазорі між ротором і статором магнітне поле такого ж виду, як і в звичайному сельсині.

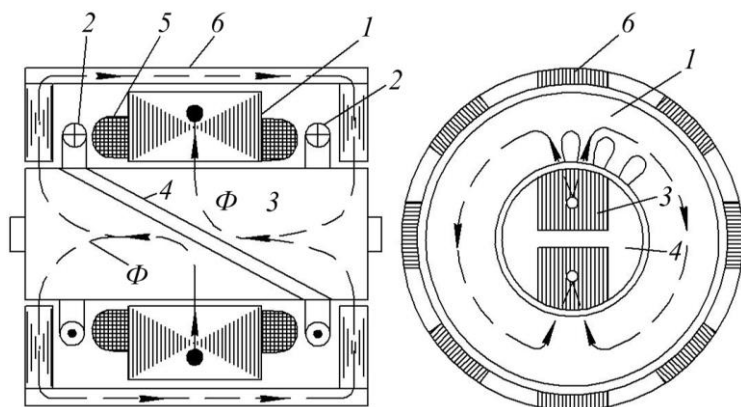


Рис. 4.58 – Пристрій безконтактного сельсина

Безконтактні сельсини набули значного поширення, однак їх недоліками є: 1) ускладнення конструкції, 2) подвоєна величина повітряних зазорів в магнітному колі, 3) підвищені розміри і вага.

Сельсини також виготовляються для роботи при $f = 50 - 1000$ Гц.

Універсальний колекторний двигун: будова, принцип дії, схеми вмикання, основні експлуатаційні властивості, застосування

Універсальними називають колекторні двигуни, які можуть працювати як від мережі постійного, так і від мережі однофазного змінного струму.

Колекторний двигун постійного струму в принципі може працювати від мережі змінного струму, так як 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 змінюється напрям струму в обмотці збудження, тобто змінюється полярність полюсів.

Однофазні колекторні двигуни мають переважно послідовне збудження. Застосування паралельного збудження (рис. 4.59, а) в даному випадку обмежується значною індуктивністю паралельної обмотки збудження, що має велику кількість витків. Це створює значний фазовий зсув між струмом якоря I_a і струмом збудження I_z на кут ψ (рис. 4.59, б). Середнє значення електромагнітного моменту в цьому випадку визначається виразом, враховуючи кут зсуву між струмом якоря і магнітним потоком.

$$M_{\text{нап}} = c_m \left(\frac{\Phi_{\text{макс}}}{\sqrt{2}} \right) I_a \cos(\psi + \delta), \quad (4.98)$$

де $\Phi_{\text{макс}}$ – максимальне значення магнітного потоку;

ψ – кут зсуву фаз між струмом якоря і струмом збудження;

δ – кут зсуву фаз між струмом збудження і магнітним потоком, обумовлений наявністю магнітних втрат в машині $[(\psi + \delta) \approx 90^\circ, \text{ а отже, } \cos(\psi + \delta) \approx 0]$.

В двигуні послідовного збудження струм якоря I_a і струм збудження I_z збігаються по фазі: $\psi = 0$ (рис. 4.59, в). Тому середнє

значення електромагнітного обертового моменту в двигуні послідовного збудження $M_{\text{посл}}$ більше, ніж у двигуні паралельного збудження

$$M_{\text{посл}} = c \left(\frac{\Phi_{\text{макс}}}{\sqrt{2}} \right) I_a \cos \delta \quad (4.99)$$

Електромагнітний момент двигуна послідовного збудження при роботі від мережі змінного струму має постійну складову $M_{\text{пост}}$ (рис. 4.59, д) та змінну складову $M_{\text{зм}}$, що змінюється з частотою, рівною подвоєній частоті мережі f_1 (рис. 4.59, е). Результуючий момент цього двигуна є пульсуючим $M_{\sim} = M_{\text{посл}}$ (рис. 4.59, ж): $M_{\sim} = M_{\text{посл}} + (-M_{\text{зм}})$. Невеликі ділянки графіка з негативним (гальмуючим) моментом обумовлені фазовим зрушенням між векторами магнітного потоку $\Phi_{\text{макс}}$ і струмом I_1 (рис. 4.59, з). Пульсації моменту $M_{\sim}$ практично не порушують роботу двигуна, включеного до мережі змінного струму, так як згладжуються за рахунок моменту інерції обертового якоря.

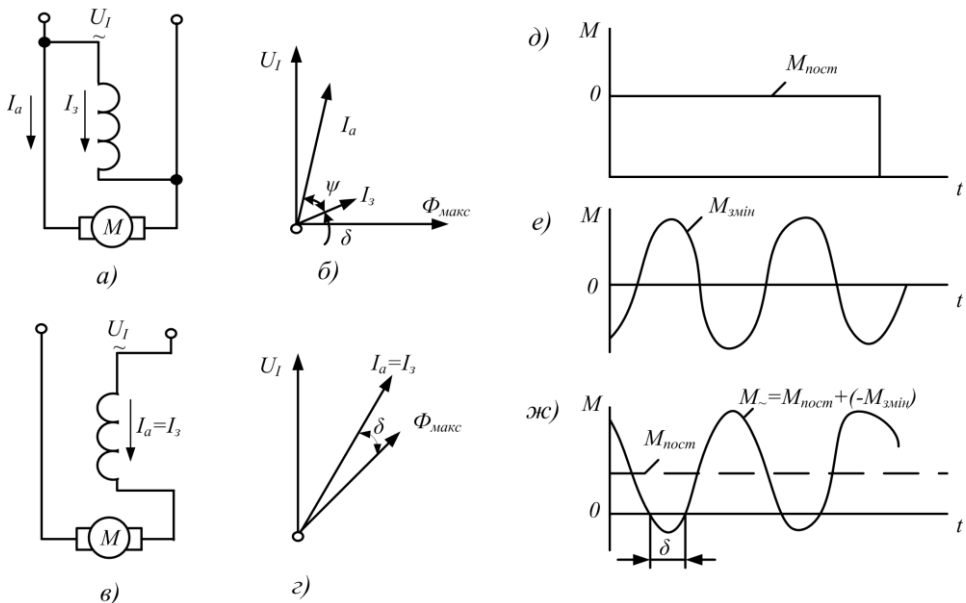


Рис. 4.59 – До принципу роботи універсального колекторного двигуна

За своєю конструкцією універсальні колекторні двигуни відрізняються від двигунів постійного струму тим, що їх станина і головні полюси виготовляються шихтованими з листової електротехнічної сталі. Це дає можливість скоротити магнітні втрати, які при роботі двигуна від мережі змінного струму підвищуються, так як змінний струм в обмотці збудження викликає перемагнічування всьому магнітному колу, включаючи станину і сердечники полюсів.

Основний недолік однофазних колекторних двигунів – важкі умови комутації. Справа в тому, що в комутуючих секціях крім реактивної ЕРС і ЕРС зовнішнього поля наводиться трансформаторна ЕРС $e_{тр}$, діюче значення якої

$$E_{тр} = 4,44 f_1 W_c \Phi_{макс} \quad (4.100)$$

Ця ЕРС наводиться змінним магнітним потоком збудження, зв'язаним з комутуючими секціями. Для зменшення трансформаторної ЕРС необхідно зменшити потік $\Phi_{макс}$, а щоб потужність двигуна при цьому залишилася попередньою, слід збільшити кількість полюсів в двигуні.

Застосування в обмотці якоря двигуна одновиткових секцій $W_c = 1$ також сприяє обмеженню $E_{тр}$, але при цьому збільшується кількість пластин в колекторі, а отже, зростають його розміри. Застосування додаткових полюсів з обмоткою, включеною послідовно в коло якоря, дозволяє досягти повної взаємної компенсації трансформаторної ЕРС тільки при певних значеннях струму якоря і частоти обертання. При інших режимах роботи двигуна умови комутації залишаються важкими. Регулювання частоти обертання і реверсування однофазного колекторного двигуна виконуються так само, як і в двигунах постійного струму з послідовним збудженням.

В універсальному колекторному двигуні намагаються отримати приблизно однакові частоти обертання при номінальному навантаженні як на постійному, так і на змінному струмі. Досягається це тим, що обмотку збудження двигуна виконують з відгалуженнями: при роботі двигуна від мережі постійного струму обмотка збудження використовується повністю, а при роботі від мережі змінного струму – частково (рис 4.60, а).

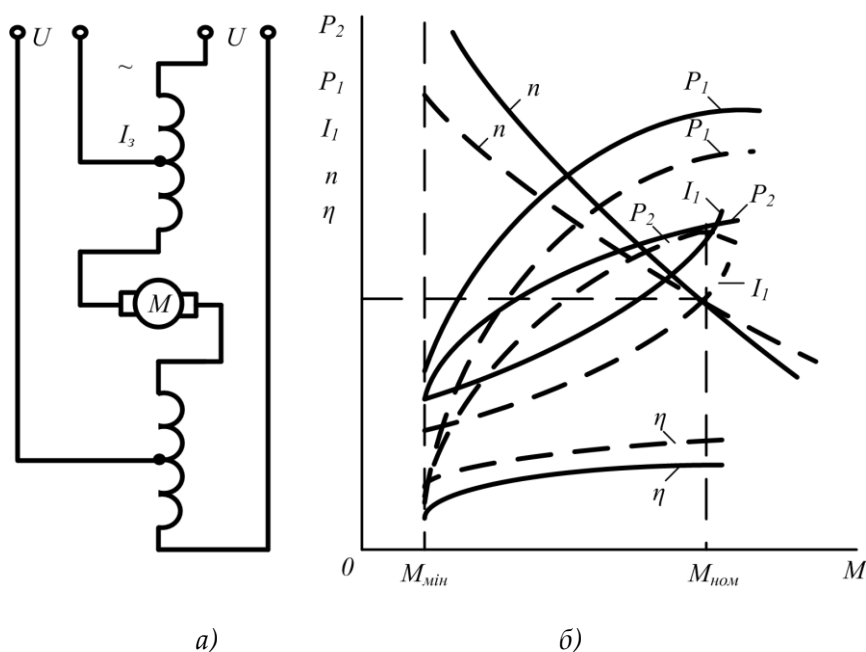


Рис. 4.60 – Схема з'єднань і робочі характеристики універсального колекторного двигуна

Розбіжності в характеристиці двигуна на постійному або змінному струмі пояснюються тим, що при роботі від мережі змінного струму на величину і фазу струму впливають індуктивні опори обмоток якоря та збудження. Однак зменшення кількості витків обмотки збудження забезпечує зближення характеристик лише при навантаженні, близькому до номінального. На рисунку 4.60, б наведено робочі характеристики універсального колекторного двигуна (суцільними лініями – при роботі двигуна від мережі змінного струму, а переривчастими – від мережі постійного струму).

Струм I_1 універсальних двигунів при роботі від мережі змінного струму більший, ніж при роботі цього ж електродвигуна від мережі постійного струму, так як змінний струм 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 автоматичці, для приводу різного електроінструменту, побутових електроприладів та ін.

? КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть принцип дії асинхронного двигуна.
2. З яких основних частин складається асинхронний двигун і яке їх призначення?
3. Що таке ковзання і як його визначають?
4. З якою максимальною швидкістю може обертатися асинхронний двигун при частоті мережі 50 Гц?
5. Розкажіть про режим холостого ходу і короткого замикання асинхронного двигуна.
6. Розкажіть про зведення величини обмотки ротора до обмотки статора.
7. В якому режимі знаходиться асинхронний короткозамкнений двигун при пуску?
8. Чому струм холостого ходу в асинхронному двигуні відносно більший, ніж у трансформаторі?
9. Чим відрізняється г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна від т-подібної?
10. Зобразіть енергетичну діаграму асинхронного двигуна та поясніть її.
11. Як визначається ККД асинхронного двигуна?
12. Що таке критичне ковзання і від яких величин воно залежить?
13. Яке призначення пускового реостату в асинхронному двигуні з фазним ротором?
14. Назвати переваги і недоліки пуску трифазного короткозамкненого асинхронного двигуна прямим вмиканням у мережу.
15. Що потрібно зробити для зміни напрямку обертання ротора асинхронного трифазного двигуна?
16. Назвати переваги і недоліки двокліткового і глибоко пазового двигунів.
17. Пояснити принцип дії однофазного асинхронного двигуна.
18. Як можна визначити величину пускового опору для пуску трифазного двигуна у однофазному режимі?
19. Назвіть основні переваги і недоліки асинхронних генераторів.
20. Назвіть різновиди конструкції ротора асинхронних виконавчих двигунів.

5 СИНХРОННІ МАШИНИ

Синхронні машини – це безколекторні машини змінного струму. За своєю конструкцією вони відрізняються від асинхронних машин лише конструкцією ротора, який може бути явнополюсним або неявнополюсним. Що ж до властивостей, то синхронні машини відрізняються синхронною частотою обертання ротора ($n_2=n_1=const$) при будь-якому навантаженні, а також можливістю регулювання коефіцієнта потужності, встановленням такого його значення, при якому робота синхронної машини стає найбільш ефективною і економічною. Синхронні машини зворотні і можуть працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Синхронні генератори складають основу електротехнічного устаткування електростанцій, тобто практично вся електроенергія виробляється синхронними генераторами. Одинична потужність сучасних синхронних генераторів досягає мільйона кіловат і більше. Синхронні двигуни застосовуються головним чином для приводу пристроїв великої потужності. У великих електроенергетичних установках синхронні машини іноді використовуються як компенсатори – генератори реактивної потужності, що дозволяє підвищити коефіцієнт потужності всієї установки. У даному розділі розглянуті головним чином трифазні синхронні машини.

5.1 ОСОБЛИВОСТІ ГЕНЕРАТОРІВ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ

За основними технічними параметрами, номінальною потужністю і частотою обертання синхронні генератори для автономних систем не мають спеціальної класифікації. В даний час верхня межа їх потужності складає 6300 кВт.

Перевагу в розвитку отримали генератори з частотою обертання 1500, 1000, 750 об/хв, проте випускаються і генератори з частотою обертання 500 і 375 об/хв. За частотою струму окрім генераторів на 50 і 60 Гц є генератори нестандартної частоти, генератори з частотою 400 Гц і високочастотні генератори до 10000 Гц.

Сфера застосування

За сферою застосування синхронні генератори підрозділяються на *стаціонарні, пересувні, транспортні і тягові*.

Пересувні генератори можуть розміщуватися в залізничному вагоні, автофургоні, причепі, контейнері тощо. Проте на відміну від транспортних і тягових генераторів ці генератори можуть працювати тільки при нерухомому стані вказаних пристроїв.

Більшість синхронних генераторів є дизельними. Проте приводом може бути і газова турбіна, і електродвигун.

Як правило, кожен генератор проектується під конкретний тип приводного двигуна. При цьому встановлюються вимоги до більшості параметрів і характеристик.

Основні технічні характеристики

Сучасні синхронні генератори автономних енергетичних систем виконують з безщітковими системами збудженням.

Синхронний генератор типу СГ 2-85/45-12 призначений для тривалої роботи в стаціонарних установках, в невибухонебезпечному середовищі з приводом від дизеля, парової або газової турбіни або від електродвигуна.

Збудження генератора – від збуджуючого тиристорного пристрою з живленням від додаткової обмотки, розташованої на статорі генератора. Напруга збудження – 36 В, струм збудження – 147 А. Виконання генератора: за ступенем захисту – IP23, способом охолодження – ICA01, формою виконання – IM1001.

З'єднання обмотки статора – зірка з виведеною нульовою точкою. Ізоляція обмоток статора і ротора – класу В типу “Моноліт-2”.

Синхронний генератор типу СГД103-8 призначений для роботи в стаціонарних установках, в закритих приміщеннях в невибухонебезпечному середовищі з дизельним приводом.

Збудження – від збудника типу В18-2УЗ, змонтованого зверху на корпусі генератора і зчленованого з валом пасово-ремінною передачею.

Обмотка статора генератора з'єднана в зірку з виведеною нульовою точкою. Ізоляція обмотки – не нижче класу В для статора і класу F для ротора. Вентиляція – витяжна аксіальна.

Допустимий рівень звуку генератора із збудником – не більше 95 дБ.

Допускається перевантаження 10% номінальної потужності протягом 1 год при роботі з коефіцієнтом потужності 0,8.

Номінальна зміна напруги – 30%. Допускається паралельна робота з іншими генераторами. Генератор підлягає до зняття з виробництва. В нових установках його застосовувати не рекомендується.

Синхронні генератори типу СГД 625-1500 і СГД 625-1500М призначені для роботи у складі стаціонарних дизель-електричних агрегатів. Виконання генераторів – захищене, форма виконання – ІМ1003. Спосіб вентиляції – ІСА01. Збудження – електромашинне від вбудованих збудників типу П71-2М. Частота обертання – 1500 об/хв. Частота струму – 50 Гц, коефіцієнт потужності – 0,8.

Синхронні генератори серії СГД2 і СГД2М. Генератори СГД2 (модернізовані – СГД2М) призначені для експлуатації на стаціонарних електростанціях з приводом від двигунів внутрішнього згорання. У комплект установки входять генератор і збуджуючий пристрій – статичний випрямляч. Конструктивне виконання генератора – ІМ7115 з одним стояковим підшипником ковзання. Виконання за способом захисту генератора – ІР11, коробки виводів – ІР21, збуджуючого пристрою – ІР00. Спосіб охолодження – ІСА01.

Генератори мають 16 полюсів (синхронна частота обертання 375 об/хв) і розраховані на роботу з $\cos\varphi=0,8$. Схема з'єднання обмотки статора – зірка з шістьма виводами у генераторів на номінальну напругу 6300 В і чотирма виводами у генераторів на номінальну напругу 400 В. Клас нагрівостійкості ізоляції – В. В позначенні генераторів після назви серії (СГД2, СГД2М) указуються умовний габарит, довжина осердя (см), число полюсів, кліматичне виконання (УХЛ4), літери УВ, що стоять в позначенні після числа полюсів, указують, що генератор виконаний з посиленням кінцем валу. З'єднання з валом приводного двигуна – жорстке за допомогою фланця.

Початкове збудження – без використання стороннього джерела струму.

Синхронний генератор типу БГСП 17-61-8 з безщітковою системою збудження призначений для комплектації потужних дизельних станцій, розміщених в залізничному вагоні.

У генераторі застосовано повітряне охолодження за розімкненим циклом.

Осердя статора запресоване в станину. Пази статора – відкриті. Обмотка – двошарова петлева з термореактивною ізоляцією.

Ротор виготовлений з явновираженими полюсами. Остов ротора і осердя полюсів зібрані з окремих штампованих сталевих листів. Обмотка полюсів виконана з неізольованої шинної міді, гнутої на ребро. На полюсних наконечниках розташована демпферна обмотка з круглих латунних стрижнів.

В генераторі застосована безщіткова система збудження, що складається з синхронного збуджувача, в якому нерухомий індуктор розташований усередині якоря, що обертається, і трифазного перетворювача. Обмотка збудження збуджувача живиться через тиристорний перетворювач, виконаний за однофазною двонапівперіодною випрямною схемою, від однофазної додаткової обмотки статора. Додаткові і основні обмотки статора мають одне і те ж число пар полюсів. При холостому ході і в номінальному режимі генератора збудження збудника забезпечується від напруги основної частоти додаткової обмотки, а в режимах коротких замикань статора – від ЕРС вищих гармонік поля, що наводяться в додатковій обмотці статора.

Синхронні генератори серії ОС і ЕСС, трифазні, із статичною системою збудження і автоматичним регулюванням напруги, призначені для тривалого режиму роботи. Вони служать джерелами змінного струму частотою 50 Гц і номінальною напругою 230 і 400 В в стаціонарних і пересувних електроустановках. Загальні технічні вимоги до генераторів потужністю до 100 кВт викладені в ГОСТ 22407-85.

Ненавантажений генератор повинен забезпечити запуск прямим включенням асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором потужністю не більше 70% номінальної потужності генератора і кратністю пускового струму не більше 7. Співвідношення потужностей паралельно працюючих генераторів має бути не більше 1:3.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої лінійної напруги при симетричному навантаженні – не вище 5 %. Допустимі кути нахилу генератора при роботі: подовжній – до 15°, поперечний – до 30°. Режим роботи – тривалий. Допустимий рівень шуму – по 1-му класу ГОСТ 16372-84. Статор має безстанинне виконання. Ротор – чотириполюсний, з демпферними обмотками і контактними кільцями для живлення обмоток збудження. Відцентровий вентилятор

аксіального охолодження генератора розташований з боку приводу. Апаратура управління, зокрема випрямний пристрій, розміщені під ковпаком з боку, протилежного приводу.

Точність підтримки напруги генераторів $\pm 2\%$, зміна уставки напруги – в межах $\pm 5\%$.

Синхронні генератори серії ЕСС мають самозбудження через напівпровідникові випрямлячі. Генератори забезпечені апаратурою для автоматичного регулювання напруги, що складається з блоку регулювання напруги, блоку корегування і потенціометра уставки. Генератори серії ЕСС5 випускаються на напругу 230, 400 і 440 В і частоти 50 Гц при частоті обертання 1000 або 1500 об/хв і 60 Гц при 1200 або 1800 об/хв. Ці генератори не призначені для паралельної роботи, мають чотири варіанти комплектації по апаратурі управління і збудження.

Синхронні генератори типу ГАБ входять в комплект бензоелектричних агрегатів типу АБ, призначених для роботи в якості перевізних джерелами енергії.

Бензоагрегати забезпечують нормальну роботу при температурі навколишнього повітря від $+50$ до -50°C (для тропічного виконання - від $+50$ до -10°C), при відносній вологості до 98%, при температурі до $+25^{\circ}\text{C}$ (для тропічного виконання – при температурі до $+50^{\circ}\text{C}$), при висоті установки над рівнем моря до 1000 м. При збільшенні висоти установки до 2000 м потужність агрегатів знижується на 10%, при збільшенні висоти до 3000 м – на 30%.

Як первинні двигуни в агрегатах АБ-2-М1 застосовані бензинові двигуни типу УД-15Г, в агрегатах АБ-4-М1 – бензинові двигуни типу УД-25Г, в агрегатах АБ-8-Т-М – двигуни типу “Москвич”. Частота обертання валу генераторів – 3000 об/хв.

Генератори безпосередньо зчленовані з валом двигуна, мають фланцеве виконання. Корпус генераторів відлитий з алюмінієвого сплаву. У верхній частині корпусу знаходиться відсік для розміщення блоку випрямлячів.

У пази статора закладено дві обмотки – силова і додаткова, яка служить для самозбудження генератора. Ротор генератора виконаний з двома явно вираженими полюсами, на яких розташовуються котушки обмотки збудження. Для забезпечення самозбудження генератора між котушками збудження розміщено два постійні магніти. Електрорушійна сила, що наводиться потоком постійних

магнітів в додатковій обмотці статора, через діоди подається через контактні кільця на обмотку збудження. Самозбудження генератора відбувається при номінальній частоті обертання і відключеному навантаженні. При будь-якому симетричному навантаженні напруга генераторів може бути встановлена ручним регулюванням в межах 380–400 В. При зміні навантаження від холостого ходу до номінального під час роботи з коефіцієнтом потужності від 0,8 до 1, напруга генераторів автоматично підтримується в межах $\pm 4\%$. Різниця між найбільшою і найменшою частотами струму при зміні навантаження від холостого ходу до номінального для генераторів на 50 Гц не перевищує 2 Гц. У генератора ГАБ-8-Т/400/Ч-400-М1 різниця частот при зміні навантаження від навантаження холостого ходу до номінального не перевищує 16 Гц, а при зміні навантаження від 50% до номінального – 10 Гц.

Генератори допускають перевантаження на 10% від номінальної потужності протягом 1 години при температурі навколишнього середовища не вище 35 °С і установці на висоті над рівнем моря до 500 м (для генератора ГАБ-8-Т/400/Ч-400-М1 – до 1000 м).

Синхронні явнополюсні двигуни загального призначення серії СДН і СДНЗ призначені для приводу насосів, млинів, вентиляторів, димососів та інших механізмів з невеликими маховими масами, які не вимагають регулювання частоти обертання.

Як правило, двигуни працюють в закритих приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами. Температура навколишнього повітря за ТУ визначається від -20 до $+40$ °С (виконання У). При цьому середньомісячне значення вологості навколишнього середовища в найбільш теплий і вологий період має бути не більше 80% при температурі $+20$ °С.

Ступінь захисту у двигунів СДН – IP00, двигунів СДНЗ – IP44. Двигуни працюють в невибухонебезпечному середовищі, що не містить агресивних газів і пари в концентраціях, які можуть зруйнувати металеві частини та ізоляцію.

Двигуни цих серій виконують із станиною на лапах, з двома стояковими підшипниками ковзання, з горизонтальним розташуванням валу з одним вільним циліндричним кінцем.

Корпус статора – зварний з листової сталі. Між пакетами осердя статора є радіальні канали для проходу повітря, що охолоджує.

Обмотка статора – двошарова, петлева з обмотувального дроту марки ПЕТВСД без додаткової виткової ізоляції. Корпусна ізоляція – термореактивна, класу нагрівостійкості F, при цьому температури частин обмотки не перевищують передбачених для ізоляції класу B. Тепловий стан обмотки і осердя статора контролюють мідними термометрами опору.

Магнітні колеса або остови роторів виконують із сталевого листового прокату, їх посадка здійснюється на вал двигунів з гарантованим натягом без шпонок, класу нагрівостійкості F, при цьому температури частин обмотки не перевищують передбачених для ізоляції класу B. Тепловий стан обмотки і сердечника статора контролюють мідними термометрами опору.

Магнітні колеса або остови роторів виконують із сталевого листового прокату, їх посадка здійснюється на вал двигунів з гарантованим натягом без шпонок.

Обмотка збудження намотана з неізольованої смугової міді на ребро. Витки котушок ізольовані один від одного азбестовим папером і від корпусу – листами склотекстоліту і гетинаксовими (склотекстолітовими) шайбами.

Пускова (демпферна) обмотка виконана з мідних і латунних круглих стрижнів, замкнутах накоротко сегментами із смугової міді.

Синхронні явнополюсні компресорні двигуни серії СДК, СДКП, СДКМ призначені для приводу компресорів. Двигуни серії СДК призначені для невибухонебезпечного навколишнього середовища, в якому не містяться струмопровідний пил, агресивні гази і пари. Двигуни серії СДКП застосовують у вибухонебезпечних зонах (приміщеннях). Для приводу аміачних поршневих компресорів призначені двигуни серії СДКМ.

Виконання двигунів – горизонтальне, консольне (ротор насаджується на консольний кінець валу компресора). Корпус статора – зварний з листової сталі, має опорні лапи з отворами для кріплення і штифтовки. Сегменти збирають в пакети завтовшки 40 мм і розділяють вентиляційними каналами.

Ізоляція обмоток статора і ротора двигунів за нагрівостійкістю відповідає класу B. Ізоляція обмотки статора термореактивна, типу “Моноліт-2”.

Обмотка статора двигунів має шість вивідних кінців і з'єднується в зірку. Вивідні кінці обмотки статора виведені на ізолятори. У

двигунах типу СДКП вивідні кінці обмотки розташовуються в коробці виводів, що продувається під надмірним тиском.

Для контролю температури обмотки і осердя статора між двома шарами обмотки і на дні паза укладені термометри опору.

У двигунах серії СДК щити штамповані, збірні. Вони захищають внутрішню порожнину двигуна від попадання сторонніх предметів і забезпечують в ньому необхідний напрям потоку повітря. Магнітні колеса ротора виконані із сталі. Осердя полюсів виготовляють з листової сталі і кріплять шпильками до обода магнітного колеса.

Для забезпечення циркуляції повітря, що охолоджує, усередині двигуна на магнітне колесо кріплять напірні вентиляційні лопатки.

Двигуни серії СДКП виготовляються розімкненим або замкнутим циклом вентиляції. При замкнутому циклі вентиляції охолодження повітря здійснюють водяними повітроохолоджувачами, вбудованими в корпуси двигунів. Температура води, що охолоджує, на вході в повітроохолоджувач зазвичай має бути не вище + 30°C, а тиск води в повітроохолоджувачах – не більше 30 кПа. При розімкненому циклі вентиляції надмірний тиск підтримують вентилятором, що забезпечує номінальну витрату повітря. Надмірний тиск регулюють заслінкою, встановленою на патрубку виходу нагрітого повітря. При замкнутому циклі вентиляції надмірний тиск створюється вентилятором підживлення. Перед пуском електродвигуни продувають повітрям в кількості, що забезпечує продування не менш п'ятикратного об'єму всієї вентиляційної системи. Для автоматизації процесу продування при замкнутому циклі вентиляції на корпусі електродвигуна передбачений механічний клапан продування. Для підживлення і створення надмірного тиску система вентиляції забезпечує забирання повітря з невибухонебезпечної зони (приміщення). При зниженні статичного тиску повітря в системі продування нижче 98 Па.

У двигунах серії СДКМ охолодження двигунів – повітряне в режимі самовентиляції, а контактних кілець і траверси – повітряне, примусове. Перед пуском і під час роботи кожух контактних кілець продувають безперервно чистим повітрям, що не містить вогне- і вибухонебезпечних газів, пари і пилу. Вміст неструмопровідного пилу в навколишньому повітрі не повинен перевищувати 0,2 мг/м³.

Обмотка збудження двигунів всієї серії складається з котушок, насаджених на сердечники полюсів. Котушки виготовляють із смугової міді, намотаної на ребро. Пускова клітка складається з круглих мідних

або латунних стрижнів, розташованих в пазах полюсного наконечника, і мідних сегментів, до яких приварені стрижні. Всі сегменти сполучені між собою і утворюють замкнутий контур.

Збудження двигунів здійснюють від тиристорних збуджувачів, які забезпечують: збудження електродвигуна у всіх нормальних режимах роботи, ручне або автоматичне регулювання струму збудження; подачу збудження при пуску електродвигуна у функції струму статора, гасіння поля при відключенні електродвигуна.

Тиристорний збуджувач має захист від аварійних перевантажень, від несправностей системи охолодження і ланцюгів управління, а також від асинхронного ходу синхронного двигуна. Збудники тиристорів виконують на напругу 380 В. Їх підключають до мережі через силові трансформатори, що погоджують.

Пуск електродвигунів – асинхронний, безпосередньо від мережі при повній напрузі з розвантаженим компресором.

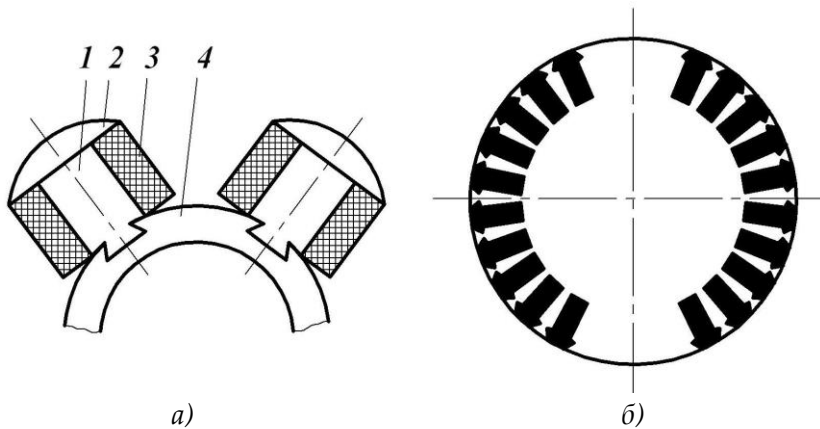
Гарантійний термін служби двигунів серії СДК, СДКМ і СДКП встановлюється 2,5 роки з дня пуску двигунів в експлуатацію при гарантійному напрацюванні приблизно 12000 год.

5.2 БУДОВА СИНХРОННОЇ МАШИНИ

Синхронна машина складається з нерухомої частини – статора, і частини, що обертається, – ротора. Статори синхронних машин в принципі не відрізняються від статорів асинхронних двигунів, тобто складаються з корпусу, осердя і обмотки.

Конструктивне виконання статора синхронної машини може бути різним залежно від призначення і габаритів машини. Так, в багатополюсних машинах великої потужності при зовнішньому діаметрі осердя статора більше 900 мм пластини осердя роблять з окремих сегментів, які при збірці утворюють циліндр осердя статора. Корпуси статорів великогабаритних машин виготовляють роз'ємними, що необхідно для зручності транспортування і монтажу цих машин.

Ротори синхронних машин можуть мати дві конструкції, що принципово розрізняються: явнополюсну і неявнополюсну (рис. 5.1 а, б).



a – ротор з явновираженими полюсами; *б* – ротор з неявновираженими полюсами

Рис. 5.1 – Конструкція роторів синхронних машин

В енергетичних установках по виробництву електроенергії змінного струму як первинні (приводні) двигуни синхронних генераторів застосовують в основному три види двигунів: парові турбіни, гідравлічні турбіни або двигуни внутрішнього згорання (дизелі). Застосування будь-якого з наведених двигунів принципово впливає на конструкцію синхронного генератора.

Якщо приводним двигуном є гідравлічна турбіна, то синхронний генератор називають гідрогенератором (кольорова вкладка, рис. 5.2).

Гідравлічна турбіна зазвичай розвиває невелику частоту обертання (60–500 об/хв), тому для отримання змінного струму промислової частоти (50 Гц) в гідрогенераторі застосовують ротор з великим числом полюсів. Ротори гідрогенераторів мають явнополюсну конструкцію, тобто з явно вираженими полюсами, при якій кожен полюс виконують у вигляді окремої вузла, що складається з осердя 1, полюсного наконечника 2 і полюсної котушки 3 (рис. 5.1).

Всі полюси ротора закріплені на ободі 4, що є також і ярмом магнітної системи машини, в якому замикаються потоки полюсів. Гідрогенератори зазвичай виготовляються з вертикальним розташуванням валу. Парова турбіна працює при великій частоті обертання, тому генератор, що приводиться нею в обертання (турбогенератор), є швидкохідною синхронною машиною. Ротори цих генераторів

виконують або двополюсними ($n_1=3000$ об/хв), або чотириполюсними ($n_1=1500$ об/хв).

В процесі роботи турбогенератора на його ротор діють значні відцентрові сили. Тому за умовами механічної міцності в турбогенераторах застосовують неявнополюсний ротор, що має вид подовженого сталевго циліндра з подовжніми пазами, що фрезують на поверхні, для обмотки збудження (рис. 5.1, б). Осердя неявнополюсного ротора виготовляють у вигляді цілісної сталевго поковки разом з хвостовиками, або ж роблять збірним. Обмотка збудження неявнополюсного ротора займає лише 2/3 його поверхні (по периметру). Для захисту лобових частин обмотки ротора від руйнування дією відцентрових сил, ротор з двох сторін прикривають сталевими бандажними кільцями, що виготовляються зазвичай з немагнітної сталі.

Турбогенератори (кольорова вкладка, рис. 5.3) і дизель-генератори (кольорова вкладка, рис. 5.4) виготовляють з горизонтальним розташуванням валу. Дизель-генератори розраховані на частоту обертання 600–1500 об/хв і виконуються з явнополюсним ротором (рис. 5.1, а).

На рисунку 5.5 (кольорова вкладка) показана конструкція полюса синхронного генератора – елемента, характерного для більшості конструкцій. На вал 1 посаджений шихтований обід 2, на якому за допомогою Т-подібного хвостовика кріпиться осердя полюса 3, виконане сумісно з полюсним наконечником. Осердя полюсів виготовлені з штампованих листів конструкційної сталі завтовшки 1,0 або 1,5 мм. Хвостовик полюса закривається в подовжньому пазу обода за допомогою клинів 9. Можливо також кріплення полюсів до обода за допомогою “ластівчиного хвоста” або шпильок.

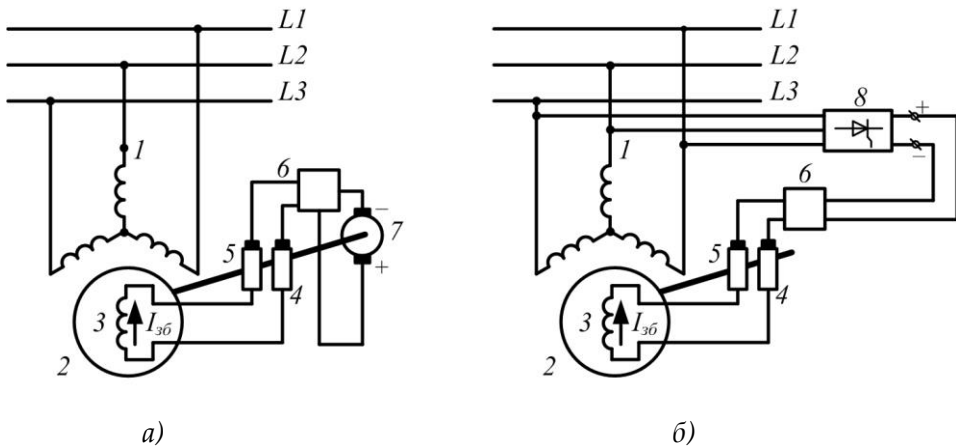
Сталеві щоки 4, стягнуті шпильками, запобігають розпушенню пакету полюса ротора. Щоки мають заплічки, що утримують полюсну котушку ротора 5.

В пазах полюсних наконечників розташовані латунні або мідні стрижні 6 пускової (заспокійливої) обмотки, замкнуті з двох сторін сегментами 7.

Між зовнішньою поверхнею полюсного наконечника і внутрішньою поверхнею осердя статора 8 є повітряний зазор. По осі полюса цей зазор δ мінімальний, а на краях – максимальний S_{max} . Така конфігурація полюсного наконечника необхідна для синусоїдального

розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі. Вона досягається тим, що поверхня полюсного наконечника має радіус $R < (D_1 - 2\delta)/2$, де D_1 – діаметр розточки осердя статора.

Збудження синхронних машин здійснюють генератором постійного струму паралельного збудження – збуджувача, який встановлено на валу ротора (рис. 5.6, а), або за допомогою напівпровідникового випрямлювача, що приєднаний до обмотки статора (рис. 5.6, б).



- 1 – обмотка статора; 2 – ротор; 3 – обмотка збудження; 4 – кільця;
5 – щітки; 6 – регульовальний реостат; 7 – збуджувач;
8 – випрямляч

Рис. 5.6 – Схеми включення синхронних машин при живленні обмотки збудження від збуджувача (а) та від випрямляча (б)

У генераторах потужністю сотні тисяч кіловат і більше часто збуджувач є генератором постійного струму з незалежним збудженням, обмотку збудження якого живить підзбуджувач – невеликий генератор постійного струму паралельного збудження, що знаходиться на одному валу з СМ і збуджувачем.

Останнім часом широко застосовують живлення обмотки збудження від напівпровідникового випрямляча як у двигунах і генераторах невеликої і середньої потужності, так і в потужних турбо- і гідрогенераторах. Струм збудження регулюють вручну регульовальним реостатом, увімкненням у коло обмотки збудження, або автоматично спеціальними регуляторами.

5.3 ОБМОТКИ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

Призначення і класифікація обмоток статора

Призначення і класифікація обмоток статора. Обмотка статора машин змінного струму має багато спільного з обмоткою якоря машин постійного струму. Але між ними є й істотна різниця – обмотки змінного струму не замкнені.

Елементом обмотки статора є секція, яка може бути одно- і багатовитковою. Секція складається з активних сторін і лобових частин. Відстань між активними сторонами секцій називається кроком обмотки y .

Крок називають діаметральним або повним, якщо він дорівнює полюсному поділу ($y = \tau = Z_1 / 2p$ – ціле число), та вкороченим, якщо він менше полюсного поділу ($y < \tau$). Застосовані в даний час обмотки статора класифікують:

- 1) за кількістю фаз – однофазні та багатофазні (головним чином трифазні);
- 2) за способом укладання секцій у пази – одношарові, коли сторона секції займає весь паз, і двошарові, коли в одному пази лежать дві сторони різних секцій (за аналогією з обмоткою якоря машини постійного струму);
- 3) залежно від ширини секцій – обмотки з повним і обмотки з укороченим кроком;
- 4) за кількістю пазів на полюс і фазу q – обмотки з цілим q і обмотки з дробовим q ;
- 5) за способом виконання секцій – котушкові і стрижневі обмотки.

Двошарові обмотки статорів поділяють на петлеві і хвильові. Переважне застосування отримали петлеві обмотки. Хвильові обмотки статорів застосовують рідко, головним чином у гідрогенераторах великої потужності. Набагато частіше хвильові обмотки змінного струму застосовують у роторах асинхронних двигунів з контактними кільцями. Виходячи з цього, у цій главі розглянуті лише петлеві обмотки статора.

Вимоги до обмоток статора машин змінного струму

До обмоток статора машин змінного струму висувають ряд вимог. Деякі з них загальні для всіх обмоток електричних машин – технологічність, мінімальна витрата провідникових та ізоляційних матеріалів, експлуатаційна надійність. Поряд з цим є спеціальні вимоги:

- 1) фазні напруги повинні бути однаковими за величиною і зміщені по фазі одна відносно одної на необхідний кут (для трифазних обмоток – 120 ел. град);
- 2) активні та індуктивні опори всіх фазних обмоток повинні бути однаковими (ця вимога не розповсюджується на двофазні обмотки);
- 3) форма кривої лінійної ЕРС повинна бути практично синусоїдальною.

Відповідно до Держстандарту виводи обмоток трифазних машин змінного струму позначають таким чином:

- перша фаза початок С1 – кінець С4;
- друга фаза початок С2 – кінець С5;
- третья фаза початок С3 – кінець С6.

Трифазна двошарова обмотка статора. Найпростіша трифазна обмотка може бути виконана трьома секціями, осі яких зсунуті по колу статора на $1/3$ подвійного полюсного ділення (120 ел. град). Кожна секція в цьому випадку – це фазна обмотка, що має назву зосередженої, тому що всі витки кожної фази цієї обмотки зосереджені у двох пазах. Зосереджені обмотки не набули практичного застосування, так як вони не задовольняють вимоги, що викладені вище.

У машинах змінного струму застосовують розподілені обмотки, в яких кожна фазна обмотка складається з декількох секцій, що займають q пазів в межах кожного полюсного ділення. Таким чином, для утворення трифазної обмотки зубцевий шар сердечника статора в межах кожного полюсного ділення необхідно розділити на три зони з q пазів у кожній. Порядок чергування таких зон під кожним полюсом повинен бути однаковим. Секції, укладені в пази однакових зон, утворюють фазні обмотки.

Число пазів, що припадають на полюс і фазу,

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m_1}, \quad (5.1)$$

де m_1 – число фаз (для трифазної обмотки $m_1=3$).

Кут зсуву між осями фазних обмоток в трифазній обмотці становить 120 ел. град. Однак, для побудови схеми обмотки зручніше це зрушення виразити в пазах. Вся окружність статора складає 360 ел. град., тому кут між сусідніми пазами (град.)

$$\alpha = 360 \frac{p}{Z_1} \quad (5.2)$$

Тоді зсув між фазними обмотками, виражений в пазах

$$\lambda = \frac{120^\circ}{\alpha} \quad (5.3)$$

Розглянемо на прикладі порядок побудови розгорнутої схеми трифазної двошарової обмотки статора. Двошарові обмотки переважно поширені в машинах змінного струму, це пояснюється рядом їх переваг, з яких головною є можливість будь-якого укорочення кроку обмотки, що дає в свою чергу можливість максимально наблизити форму кривої ЕРС до синусоїди. Однак двошарові обмотки не позбавлені недоліків, до яких, перш за все, слід віднести деякі труднощі при укладці секцій обмотки, труднощі ремонту обмотки при пошкодженні ізоляції нижнього шару, а також неможливість виконати роз'ємним статор без порушення обмотки в місцях рознімання.

Способи з'єднання секційних груп обмоток статора

Секційною групою називають ряд послідовно з'єднаних між собою секцій, які лежать в сусідніх пазах і з'єднані послідовно або паралельно, що впливає на число паралельних гілок в обмотці.

На рисунку 5.7 показано послідовне з'єднання двох секційних груп фазної обмотки, для чого необхідно нижній кінець першої секційної групи (K1A) з'єднати з нижнім кінцем другої секційної групи (K2A), а верхні кінці вивести до затискачів фазної обмотки (C1-C4). При такому з'єднанні секційних груп ЕРС фазної обмотки є сумою ЕРС всіх секційних груп.

На рисунку 5.8 показано послідовне з'єднання чотирьох секційних груп. Тут друга і третя секційні групи з'єднані верхніми кінцями. Третя і четверта – нижніми кінцями, а до виводів фазної обмотки приєднані верхні кінці першої та четвертої секційних груп. При послідовному з'єднанні секційних груп фазна обмотка незалежно від числа полюсів машини містить одну паралельну гілку ($2a = 2p$).

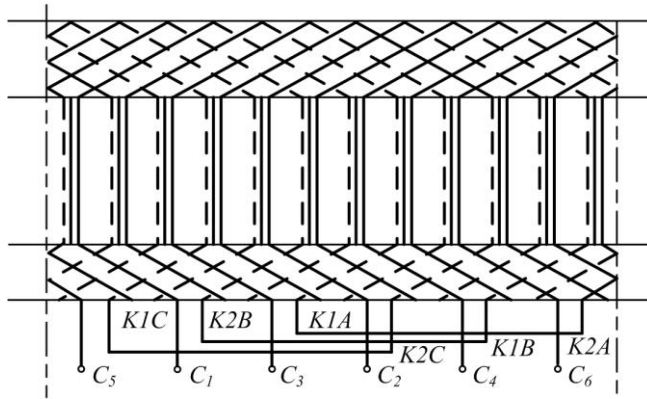


Рис. 5.7 – Послідовне з'єднання двох секційних груп фазної обмотки

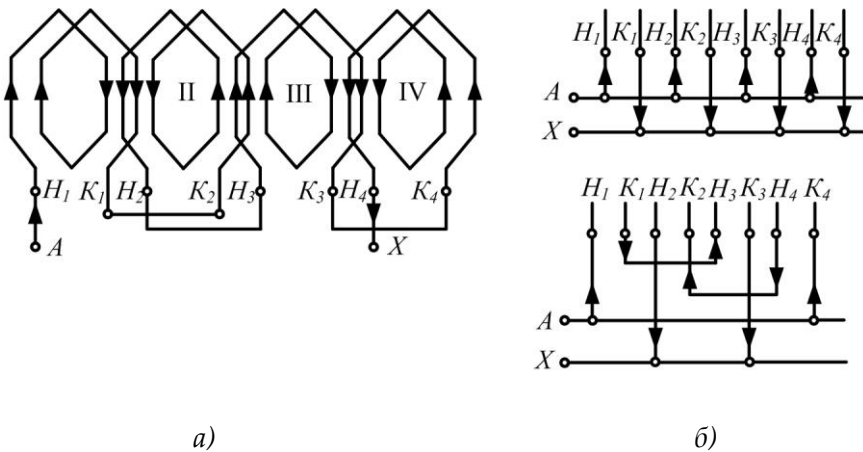


Рис. 5.8 – Послідовне з'єднання чотирьох секційних груп обмотки

Двошарова обмотка в кожній фазі має $2p$ секційних груп, тому, з'єднавши всі секційні групи паралельно, отримаємо обмотку, що складається з $2p$ паралельних гілок ($2a = 2p$).

Якщо половину секційних груп кожної фазної обмотки з'єднати паралельно в одну гілку, а потім з'єднати послідовно, то отримаємо послідовно-паралельне (змішане) з'єднання секційних груп з двома паралельними гілками в фазній обмотці ($2a = 2p$). Щоб ЕРС паралельних гілок були однакові, у кожну паралельну гілку через одну

включають секційні групи. Таким чином, в одній паралельній гілці виявляються всі парні секційні групи, а в іншій – усі непарні.

Одношарові обмотки статора. Трифазна обмотка. У одношарових обмотках (рис. 5.9) кожна сторона секції повністю заповнює паз сердечника статора. При цьому число цих груп у кожній фазі дорівнює числу пар полюсів, так що загальне число секційних груп в одношаровій обмотці $a = pm$.

Одношарові обмотки статорів поділяють на концентричні і шаблонні. У концентричній обмотці секції кожна секційна група має різну ширину і розташовується концентрично. Кроки обмотки у секцій, що входять в секційну групу, неоднакові, але їх середнє значення однакове.

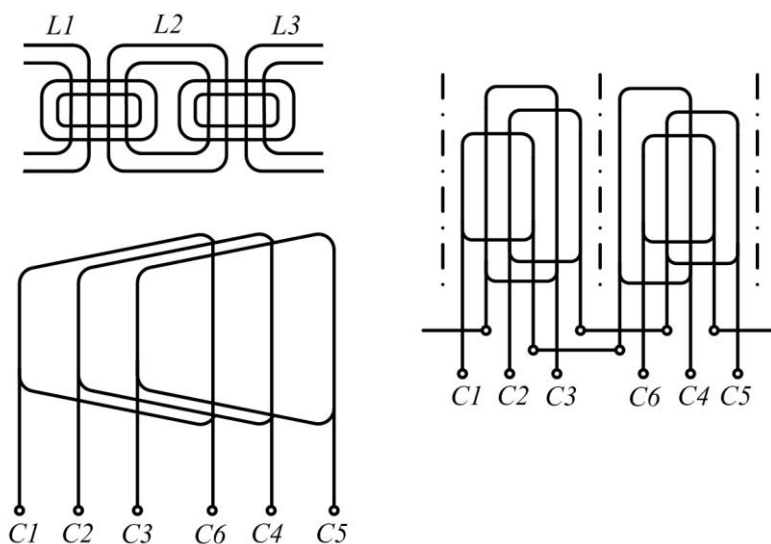


Рис. 5.9 – Одношарові обмотки статора

Розглянуту одношарову обмотку називають двоплощинною, так як лобові частини секцій цієї обмотки мають різний виліт і розташовуються в двох площинах. Така конструкція обмотки дозволяє уникнути перетинання лобових частин секцій, що належать різним фазам.

На рисунку 5.10 показана схема одношарової трифазної обмотки для машини з роз'ємним статором. Така конструкція обмотки дозволяє розібрати статор на дві частини (по лінії розрізу), не

пошкодивши жодної з секцій. Лобові частини секцій у цій обмотці розташовані в трьох площинах.

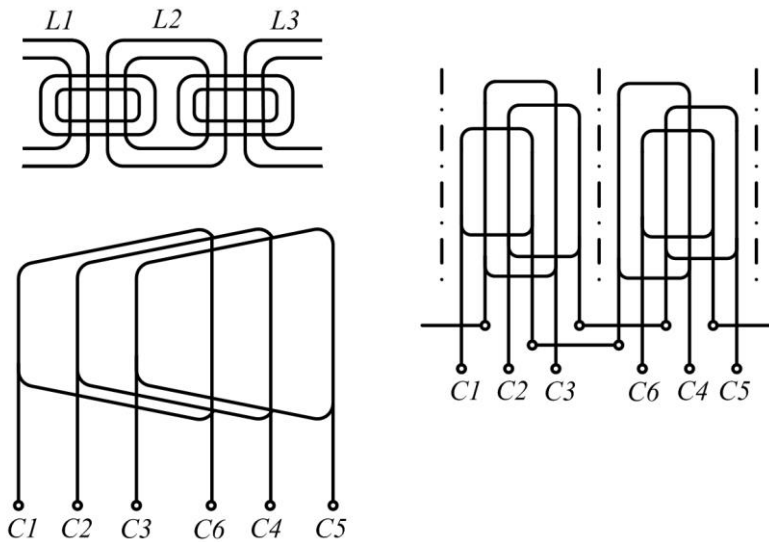


Рис. 5.10 – Одношарова трифазна обмотка для машини з роз'ємним статором

Застосування різних за розміром секцій, що утворюють секційні групи, веде до того, що секційні групи концентричних обмоток мають різні опори. Це слід враховувати при визначенні розмірів секційних груп, що утворюють фазну обмотку. Необхідно, щоб всі фазні обмотки мали однаковий опір, для чого вони повинні містити однакову кількість різних за розмірами секційних груп.

Істотний недолік концентричних обмоток – наявність секцій різних розмірів, що ускладнює виготовлення обмотки. Цей недолік відсутній у шаблонних одношарових обмоток, так як їх секції мають однакові розміри і можуть виготовлятися на загальному шаблоні. Крім того, всі секції таких обмоток мають однаковий опір, а лобові частини виходять коротше, ніж у концентричних обмотках, що зменшує витрату міді.

Як приклад розглянемо шаблонну обмотку дво полюсної машини з трьома секціями в секційній групі. Трапецеїдальна форма секцій трохи полегшує розташування лобових частин обмотки. Загальний недолік всіх одношарових обмоток (крім шаблонної) – це утруднення з розміщенням лобових частин, які доводиться розташовувати у двох і

більше площинах. Крім того, одношарові обмотки не допускають укорочення кроку секцій, що в ряді випадків необхідно для поліпшення робочих властивостей машини змінного струму.

Однофазна обмотка. Її виконують аналогічно одній фазі трифазної обмотки з тією лише різницею, що секції цієї обмотки займають $2/3$ осердя статора. Така конструкція обмотки робить її найбільш економічною, так як заповнення $1/3$ пазів статора, що залишилися, збільшило б витрату міді на виготовлення обмотки в 1,5 разу, а ЕРС обмотки – лише в 1,15 раза. Крім того, така конструкція однофазної обмотки дозволяє позбутися від третьої гармоніки ЕРС.

Трифазна обмотка з дробовим числом пазів на полюс і фазу. У потужних багатополюсних синхронних генераторах (гідрогенераторах) практично неможливо виконати обмотку статора з числом пазів на полюс і фазу $q > 1$, рівним цілому числу, так як для цього треба було б мати на статорі занадто велике число пазів. У цьому випадку обмотку статора виконують з дробовим q . Такі обмотки мають деяку перевагу перед обмотками з цілим q , тому що дозволяють при невеликих значеннях q отримати ЕРС практично синусоїдальної форми.

Обмотки статорів з дробовим q в двигунах змінного струму застосовують головним чином при серійному виробництві, коли для виготовлення листів статора двигунів з різним числом полюсів використовують один штамп. При цьому одне із значень $2p$ дає $q \neq$ ціле число. Дробове значення q може бути представлено у вигляді

$$q = a + \frac{b}{c} = \frac{ac + b}{c} \quad (5.4)$$

При цьому, очевидно, що числа b , c і $(ac + b)$ не мають спільного дільника. З урахуванням 5.4 число пазів статора

$$z = 2m_1 p q = 2p m_1 \frac{(ac + b)}{c} \quad (5.5)$$

Якщо c не кратне m_1 , то обмотка з дробовим q еквівалентна обмотці з цілим $q = ac + b$. Оскільки q більше дійсного (дробового) q в c разів, то й еквівалентне число пазів $Z_{1ек}$ більше дійсного Z_1 в c разів.

5.4 ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

При розгляді принципу дії синхронного генератора було встановлено, що на роторі синхронного генератора розташовано джерело МРС (індуктор), що створює в генераторі магнітне поле. За допомогою приводного двигуна (ПД) ротор генератора приводиться в обертання з синхронною частотою n_1 . При цьому магнітне поле ротора також обертається і, зчіплюючись з обмоткою статора, наводить в ній ЕРС.

Синхронні двигуни конструктивно майже не відрізняються від синхронних генераторів. Вони також складаються із статора з обмоткою і ротора. Тому незалежно від режиму роботи будь-яка синхронна машина має потребу в процесі збудження – наведення в ній магнітного поля.

Основним способом збудження синхронних машин є електромагнітне збудження, суть якого полягає в тому, що на полюсах ротора розташовують обмотку збудження. При проходженні по цій обмотці постійного струму виникає МРС збудження, яка наводить в магнітній системі машини магнітне поле.

До останнього часу для живлення обмотки збудження застосовувалися спеціальні генератори постійного струму незалежного збудження (збудники З), обмотка збудження яких (ОЗ) отримувала живлення постійного струму від іншого генератора (паралельного збудження), що зветься підзбудником (ПЗ). Ротор синхронної машини і якоря збудника і підзбудника розташовуються на загальному валу і обертаються одночасно. При цьому струм в обмотку збудження синхронної машини надходить через контактні кільця і щітки. Для регулювання струму збудження застосовують регулювальні реостати, що включаються в ланцюзі збудження збудника (r_1) і підзбудника (r_2).

В синхронних генераторах середньої і великої потужності процес регулювання струму збудження автоматизують.

В синхронних генераторах великої потужності – турбогенераторах – іноді як збудник застосовують генератори змінного струму індукторного типу. На виході такого генератора включають напівпровідниковий випрямляч.

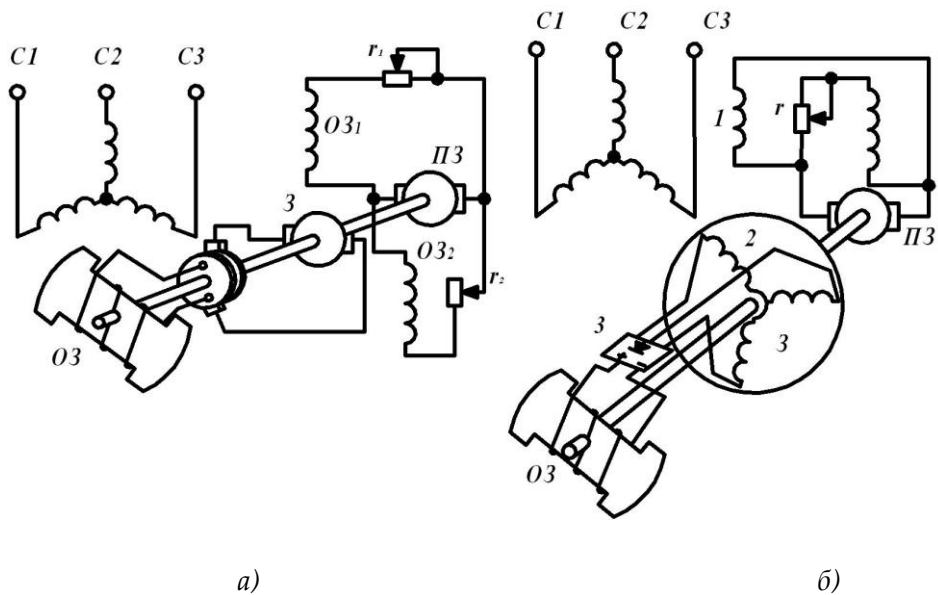


Рис. 5.11 – Контактна (а) і безконтактна (б) системи електромагнітного збудження синхронних генераторів

Регулювання струму збудження синхронного генератора в цьому випадку здійснюється зміною збудження індукторного генератора.

Отримала застосування в синхронних генераторах безконтактна система електромагнітного збудження, при якій синхронний генератор не має контактних кілець на роторі.

Як збудник і в цьому випадку застосовують генератор змінного струму (рис. 5.11, б), у якого обмотка 2, в якій наводиться ЕРС (обмотка якоря), розташована на роторі, а обмотка збудження 1 розташована на статорі. В результаті обмотка якоря збудника і обмотка збудження синхронної машини виявляються такими, що обертаються, і їх електричне з'єднання здійснюється безпосередньо, без контактних кілець і щіток. Але оскільки збудник є генератором змінного струму, а обмотку збудження необхідно живити постійним струмом, то на виході обмотки якоря збудника включають напівпровідниковий перетворювач 3, закріплений на валу синхронної машини і такий, що обертається разом з обмоткою збудження синхронної машини і обмоткою якоря збудника. Живлення постійним струмом обмотки

збудження 1 збудника здійснюється від підзбудника (ПЗ) – генератора постійного струму.

Відсутність ковзаючих контактів в ланцюзі збудження синхронної машини дозволяє підвищити її експлуатаційну надійність і збільшити ККД.

У синхронних генераторах, зокрема гідрогенераторах, набув поширення принцип самозбудження (рис. 5.11, а), коли енергія змінного струму, необхідна для збудження, відбирається від обмотки статора синхронного генератора і через знижувальний трансформатор і випрямний напівпровідниковий перетворювач (VCD) перетворюється в енергію постійного струму. Принцип самозбудження заснований на тому, що первинне збудження генератора відбувається за рахунок залишкового магнетизму магнітопроводу машини.

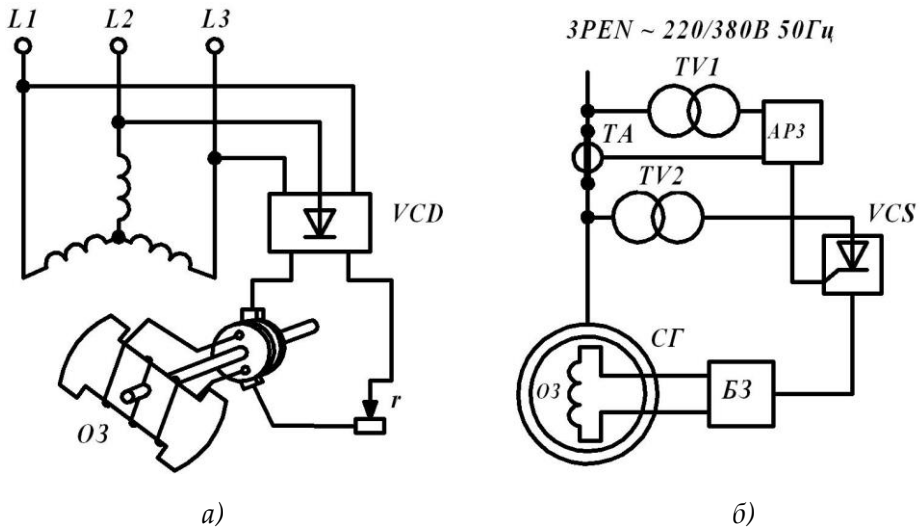


Рис. 5.12 – Принцип самозбудження синхронних генераторів

На рисунку 5.12, б представлена структурна схема автоматичної системи самозбудження синхронного генератора (СГ) з трансформатором (TV2) і тиристорним перетворювачем (VCS), через які електроенергія змінного струму з ланцюга статора СГ після перетворення в постійний струм подається в обмотку збудження. Управління тиристорним перетворювачем здійснюється за допомогою автоматичного регулятора збудження АРЗ, на вхід якого надходять сигнали напруги на виході СГ (через трансформатор напруги TV1) і струму

навантаження СГ (від трансформатора струму ТА). Схема містить блок захисту БЗ, що забезпечує захист обмотки збудження і тиристорного перетворювача від перенапружень і струмового перевантаження.

У сучасних синхронних двигунах для збудження застосовують збудливі тиристорні пристрої, що включаються в мережу змінного струму і здійснюють автоматичне управління струмом збудження в будь-яких режимах роботи двигуна, у тому числі і перехідних. Такий спосіб збудження є найбільш надійним і економічним, оскільки ККД збуджуючих тиристорних пристроїв вище, ніж генераторів постійного струму. Промисловістю випускаються збудливі тиристорні пристрої на різну напругу збудження з допустимим значенням постійного струму 320 А.

Найбільшого поширення в сучасних серіях синхронних двигунів набули збудливі тиристорні пристрої типів ТЕ8-320/48 (напруга збудження 48 В) і ТЕ8-320/75 (напруга збудження 75 В). Потужність, що витрачається на збудження, зазвичай складає від 0,2 до 5% корисної потужності машини (менше значення відноситься до машин великої потужності).

У синхронних машинах малої потужності знаходить застосування принцип збудження постійними магнітами, коли на роторі машини розташовуються постійні магніти. Такий спосіб збудження дає можливість позбавити машину від обмотки збудження. В результаті конструкція машини спрощується, стає більш економічною і надійною. Проте із-за дефіцитності матеріалів для виготовлення постійних магнітів з великим запасом магнітної енергії і складності їх обробки застосування збудження постійними магнітами обмежується лише машинами потужністю не більше декількох кіловат.

5.5 РЕАКЦІЯ ЯКОРЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Електромагнітні процеси в синхронних генераторах на холостому ході

У режимі холостого ходу синхронної машини, тобто за відсутності струму I_1 в обмотці статора, магнітне поле утворюється лише МРС обмотки збудження $F_{зб0}$. Форма графіка розподілу індукції в зазорі явнополюсної машини в цьому випадку залежить від конфігурації полюсних наконечників полюсів ротора. Для надання цій

кривій форми, близької до синусоїдальної, повітряний зазор роблять нерівномірним, збільшуючи його на краях полюсних наконечників.

Основний магнітний потік явнополюсної синхронної машини, замикаючись в магнітній системі машини, зчіплюється з обмоткою статора. Як і в асинхронних неявнополюсних машинах, магнітна система явнополюсної синхронної машини є розгалуженою симетричною магнітною системою (рис. 5.13, а), що складається з $2p$ паралельних гілок. Кожна з таких гілок є нерозгалуженим магнітним ланцюгом, що містить одну пару полюсів (рис. 5.13, б). Основний магнітний потік Φ , замикаючись в магнітному ланцюзі, проходить ряд ділянок (рис. 5.14): повітряний зазор δ , зубцевий шар статора h_{z1} , зубцевий шар ротора h_{z2} , полюс ротора h_m , спинка статора L_1 і спинка ротора (обід) $L_{об}$.

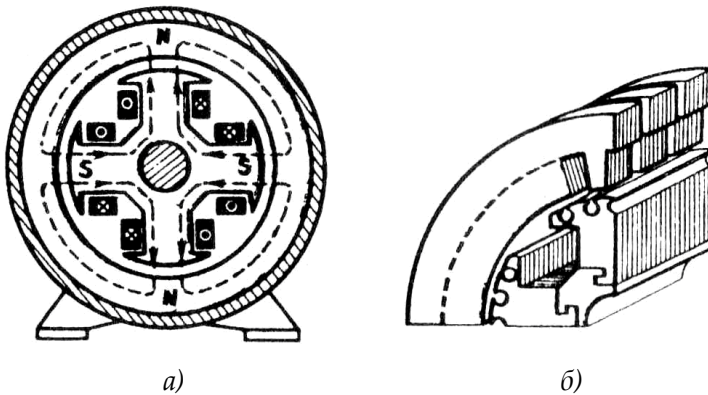


Рис. 5.13 – Магнітна система явнополюсної синхронної машини

Сума магнітних напруг на всіх ділянках магнітного ланцюга визначає МРС обмотки збудження на пару полюсів в режимі х.х. (А)

$$F_{\Sigma} = \sum F = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + 2F_m + F_{c1} + F_{об}, \quad (5.7)$$

де F_{δ} , F_{z1} , F_{z2} , F_m , F_{c1} та $F_{об}$ – відповідно магнітна напруга зазору, зубцевих шарів статора і ротора, полюсів, спинки статора і обода, А.

Порядок розрахунку магнітної напруги на ділянках магнітного ланцюга в принципі такий же, як і при розрахунку магнітного ланцюга асинхронної машини. При розрахунку магнітної напруги полюсів і спинки ротора необхідно мати на увазі, що магнітний потік на цих ділянках дещо більший основного магнітного потоку Φ на величину потоку розсіяння ротора Φ_{σ} , що є невеликою частиною

загального потоку полюсів Φ_m , що не проходить через зазор δ , який замикається в міжполюсному просторі

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \Phi / \Phi_\sigma) = \Phi \sigma_m, \quad (5.8)$$

де σ_m – коефіцієнт магнітного розсіювання полюсів ротора.

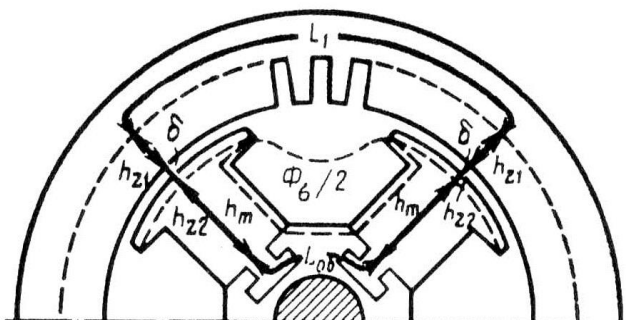


Рис. 5.14 – Ділянки магнітного ланцюга явнополюсної синхронної машини

Для синхронних явнополюсних машин коефіцієнт

$$\sigma_m = 1 + 0,2 k_{\mu 1}, \quad (5.9)$$

де

$$k_{\mu 1} = F_{10} / (2F_\delta) \quad (5.10)$$

– коефіцієнт магнітного насичення осердя статора синхронної машини;

$$F_{10} = 2 F_\delta + 2F_{z1} + F_{c1}$$

– сума магнітної напруги в сердечнику статора і повітряному зазорі, А.

Для синхронних явнополюсних машин коефіцієнт магнітного розсіювання полюсів ротора $\sigma_m = 1,1 \div 1,4$ залежно від ступеня магнітного насичення магнітопроводу машини і числа полюсів (із зростанням числа полюсів $2p$ зменшується міжполюсний простір ротора машини і магнітне розсіювання збільшується). Після розрахунку магнітного ланцюга синхронної машини будують магнітну характеристику машини, аналогічну представлений на рисунку 5.14. Використовуючи МРС обмотки збудження в режимі х.х. F , шляхом додаткових розрахунків визначають МРС обмотки збудження при навантаженні $F_{зб.н.}$. Зазвичай $F_{зб.н.} = (2,0 \div 2,2) \Sigma F$.

Набуте значення МРС $F_{зб.н}$ дозволяє розрахувати число витків в полюсній котушці ротора

$$W_{к.зб.} = F_{зб.н} / (2I_{з.б}), \quad (5.11)$$

де $I_{зб.}$ – струм в обмотці збудження синхронної машини, А.

Робота генератора при навантаженні

В процесі роботи навантаженого синхронного генератора в ньому одночасно діють МРС збудження $F_{зб.0}$ і статора (якоря) F_1 , при цьому МРС статора (якоря) впливає на МРС збудження, підсилюючи або послаблюючи поле збудження або ж спотворюючи його форму. Дія МРС обмотки статора (якоря) на МРС обмотки збудження називається реакцією якоря. Реакція якоря впливає на робочі властивості синхронної машини, оскільки зміна магнітного поля в машині супроводжується зміною ЕРС, наведеною в обмотці статора, а отже, зміною і ряду інших величин, пов'язаних з цією ЕРС. Вплив реакції якоря на роботу синхронної машини залежить від значення і характеру навантаження.

Синхронні генератори, як правило, працюють на змішане навантаження (активно-індуктивне або активно-ємнісне). Але для з'ясування питання про вплив реакції якоря на роботу синхронної машини доцільно розглянути випадки роботи генератора при навантаженнях граничного характеру, а саме: активного, індуктивного і ємнісного. Скористаємося для цього векторними діаграмами МРС. При побудові цих діаграм слід мати на увазі, що вектор ЕРС індукованої магнітним потоком збудження в обмотці статора, відстає по фазі від вектора цього потоку (а отже, і вектора МРС $\dot{F}_{зб.0}$) на 90° . Що ж до вектора струму в обмотці статора I_1 , то він може займати по відношенню до вектора $\dot{E}_{зб.0}$ різні положення, визначені кутом ψ_1 залежно від виду навантаження.

Активне навантаження ($\psi_1 = 0$). На рисунку 5.15, а представлені статор і ротор двополюсного генератора. На статорі показана частина фазної обмотки. Ротор явнополісний, обертається проти руху годинникової стрілки. У даний момент часу ротор займає вертикальне положення, що відповідає максимуму ЕРС $\dot{E}_0$ у фазній обмотці.

Оскільки струм при активному навантаженні збігається по фазі з ЕРС, то вказане положення ротора відповідає також і максимуму струму. Зобразивши лінії магнітної індукції поля збудження (ротора) і лінії магнітної індукції поля обмотки статора, бачимо, що МРС статора $\dot{F}_1$ направлена перпендикулярно МРС збудження $\dot{F}_{z\delta 0}$. Цей висновок також підтверджується векторною діаграмою, побудованою для цього ж випадку. Порядок побудови цієї діаграми наступний: відповідно до просторового положення ротора генератора проводимо вектор МРС збудження $\dot{F}_{z\delta 0}$; під кутом 90° до цього вектора у бік відставання проводимо вектор ЕРС $\dot{E}_0$, наведеною магнітним полем збудження в обмотці статора; при підключенні чисто активного навантаження струм в обмотці статора I_1 збігається по фазі з ЕРС $\dot{E}_0$, а тому вектор МРС $\dot{F}_1$ створюваний цим струмом, зрушений в просторі щодо вектора $\dot{F}_{z\delta 0}$ на 90° .

Така дія МРС статора (якоря) $\dot{F}_1$ на МРС збудження $\dot{F}_{z\delta 0}$ викличе спотворення результуючого поля машини: магнітне поле машини ослабляється під набігаючим краєм полюса і посилюється під збігаючим краєм полюса (рис. 5.15). Унаслідок насичення магнітного ланцюга результуюче магнітне поле машини дещо послаблюється. Пояснюється це тим, що розмагнічування набігаючих країв полюсних наконечників і ділянок зубцевого шару статора, що знаходяться над ними, відбувається безперешкодно, а підмагнічування збігаючих країв полюсних наконечників і ділянок зубцевого шару статора, що знаходяться над ними, обмежується магнітним насиченням цих елементів магнітного ланцюга. У результаті результуючий магнітний потік машини ослабляється, тобто магнітна система дещо розмагнічується. Це веде до зменшення ЕРС машини E_1 .

Індуктивне навантаження ($\psi_1 = 90^\circ$). При чисто індуктивному навантаженні генератора струм статора I_1 відстає по фазі від ЕРС $\dot{E}_0$ на 90° . Тому він досягає максимального значення лише після повороту ротора вперед на 90° щодо його положення, відповідного максимуму

ЕРС $\dot{E}_0$ (рис. 5.15). При цьому МРС $\dot{F}_1$ діє уздовж осі полюсів ротора зустрічно МРС збудження $\dot{F}_{\text{зб}0}$. У цьому ми також переконуємося, побудувавши векторну діаграму.

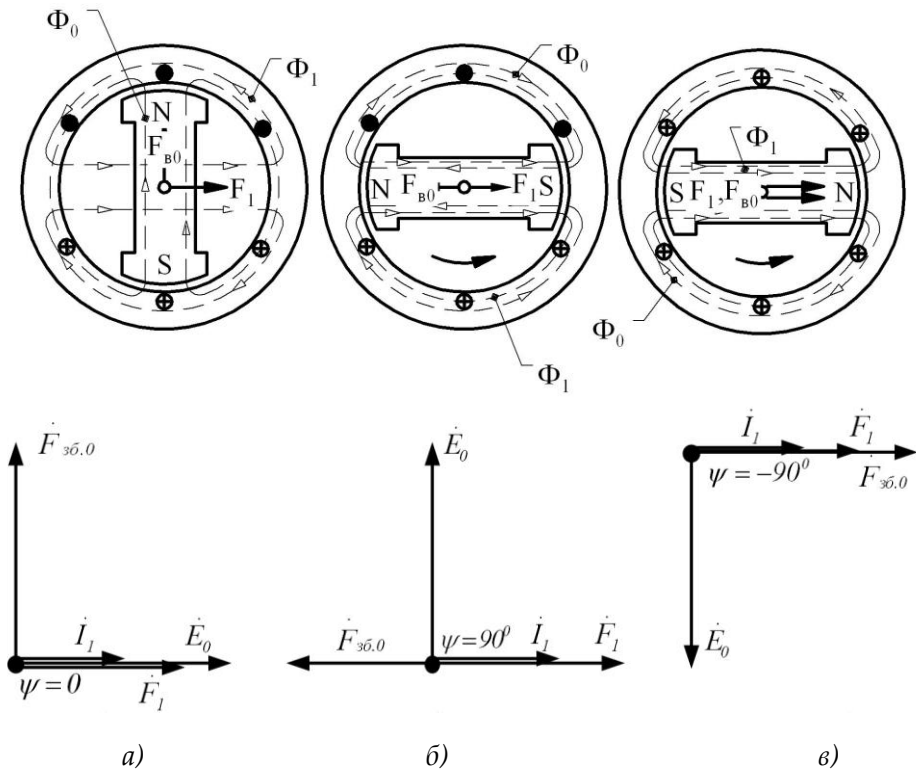


Рис. 5.15 – Реакція якоря синхронного генератора при активному (а), індуктивному (б) і ємнісному (в) навантаженнях

Таку дію МРС статора F_1 послаблює поле машини. Отже, реакція якоря в синхронному генераторі при чисто індуктивному навантаженні має подовжньо-розмагнічувальну дію.

На відміну від реакції якоря при активному навантаженні в даному випадку магнітне поле не спотворюється.

Ємнісне навантаження ($\psi=-90^\circ$). Оскільки струм $\dot{I}_1$ при ємнісному навантаженні випереджає по фазі ЕРС $\dot{E}_0$ на 90° , то свого більшого значення він досягає раніше, ніж ЕРС, тобто коли ротор

займе положення, показане на рисунку 5.15, в, магніторушійна сила статора $\vec{F}_1$ так само, як і у попередньому випадку, діє по осі полюсів, але тепер уже згідно з МРС збудження $\vec{F}_{\text{зб}0}$.

При цьому відбувається посилення магнітного поля збудження. Таким чином, при чисто ємнісному навантаженні синхронного генератора реакція якоря має подовжньо-намагнічувальну дію. Магнітне поле при цьому не спотворюється.

Змішане навантаження. При змішаному навантаженні синхронного генератора струм статора $\vec{I}_1$ зміщений по фазі відносно ЕРС $\vec{E}_0$ на кут ψ_1 , значення якого знаходяться в межах $0 < \psi_1 < \pm 90^\circ$. Для з'ясування питання про вплив реакції якоря при змішаному навантаженні скористаємося зображенням розподілення силових ліній МРС (рис. 5.16).

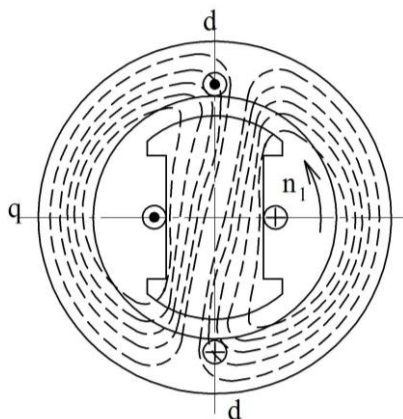


Рис. 5.16 – Магнітне поле синхронного генератора при активному навантаженні

При активно-індуктивному навантаженні (рис. 5.17, а) вектор $\vec{F}_1$ відстає від вектора $\vec{E}_0$ на кут $0 < \psi_1 < 90^\circ$. Розкладемо залишковий вектор F_1 на подовжню складову МРС статора $F_{1d} = F_1 \sin \psi_1$ і поперечну складову МРС статора $F_{1q} = F_1 \cos \psi_1$. Таке ж розкладання МРС якоря F_1 на складові можна зробити у разі активно-ємнісного навантаження (рис. 5.17, б). Поперечна складова МРС статора F_{1q} , МРС реакції якоря, поперечної осі, пропорційна активній складовій струму навантаження $I_q = I_1 \cos \psi$, тобто

$$F_{1q} = F_1 \cos \psi_1, \quad (5.12)$$

а подовжня складова МРС статора (якоря) F_{1d} МРС, що є реакцією якоря по подовжній осі, пропорційна реактивній складовій струму навантаження $I_d = I_1 \sin \psi_1$, тобто

$$F_{1d} = F_1 \sin \psi_1 \quad (5.13)$$

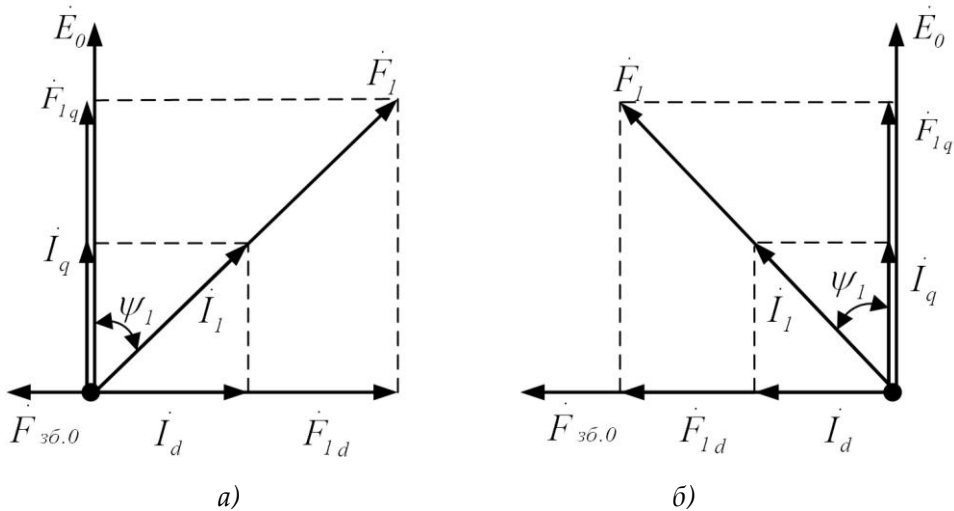


Рис. 5.17 – Реакція якоря при змішаному навантаженні

При цьому, якщо реактивна складова струму навантаження відстає по фазі від ЕРС $\dot{E}_0$ (навантаження активно-індуктивне), то МРС F_{1d} розмагнічує генератор, якщо ж реактивна складова струму $\dot{I}_d$ випереджає по фазі ЕРС $\dot{E}_0$ (навантаження активно-ємнісне), то МРС F_{1d} підмагнічує генератор.

Напрямок вектора F_{1d} щодо вектора $\dot{F}_{360.0}$ визначається характером реакції якоря, який при струмі навантаження $\dot{I}_1$, що відстає по фазі від ЕРС $\dot{E}_0$ є таким, що розмагнічує, а при струмі $\dot{I}_1$, що випереджає по фазі ЕРС $\dot{E}_0$, – що підмагнічує.

5.6 ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Властивості синхронного генератора визначаються характеристиками холостого ходу, короткого замикання, зовнішніми і регульовальними.

Характеристика холостого ходу

Характеристика *холостого ходу синхронного генератора* є графіком залежності напруги на виході генератора в режимі х.х. $U_1=E_0$ від струму збудження $I_{зб.0}$ при $n_1=const$. Схема включення синхронного генератора для зняття характеристики х.х. наведена на рисунку 5.18, а. Якщо характеристики х.х. різних синхронних генераторів зобразити у відносних одиницях $E^* = f(I_{зб}^*)$, то ці характеристики мало відрізняються одна від одної і будуть дуже подібними з нормальною характеристикою х.х. (рис. 5.18, б), яку використовують при розрахунках синхронних машин:

E^*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
$I_{зб}^*$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Тут $E^* = E_0 / U_{1ном}$ – відносна ЕРС фази обмотки статора;

$I_{зб}^* = I_{зб0} / I_{зб0ном}$ – відносний струм збудження;

$I_{зб0ном}$ – струм збудження в режимі х.х., відповідний ЕРС х.х.
 $E_0 = U_{1ном}$.

Характеристика короткого замикання

Характеристику трифазного к.з. отримують таким чином: виводи обмотки статора замикають накоротко (рис. 5.19, а) і при обертанні ротора з частотою обертання n_1 поступово збільшують струм збудження до значення, при якому струм к.з. перевищує номінальний робочий струм обмотки статора не більше ніж на 25% ($I_{1к} = 1,25I_{1ном}$). Оскільки в цьому випадку ЕРС обмотки статора має значення у декілька разів менше, ніж в робочому режимі генератора, і, отже, основний магнітний потік дуже малий, то магнітний ланцюг машини виявляється ненасиченим. З цієї причини характеристика к.з. є прямою лінією (рис. 5.19, б). Активний опір обмотки статора

невеликий в порівнянні з її індуктивним опором, тому, приймаючи $r \approx 0$, можна вважати, що при досліді к.з. навантаження синхронного генератора (його власної обмотки) є чисто індуктивним. З цього виходить, що при досліді к.з. реакція якоря синхронного генератора має поздовжньо-розмагнічувальний характер.

Векторна діаграма, побудована для генератора при досліді трифазного к.з., представлена на рисунку 5.19, в. З діаграми видно, що ЕРС $\dot{E}_k$, індукована в обмотці статора, повністю врівноважується ЕРС поздовжньої реакції якоря $\dot{E}_{ld} = -j \dot{I}_d x_{ad}$ і ЕРС розсіяння $\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_1 x_1$

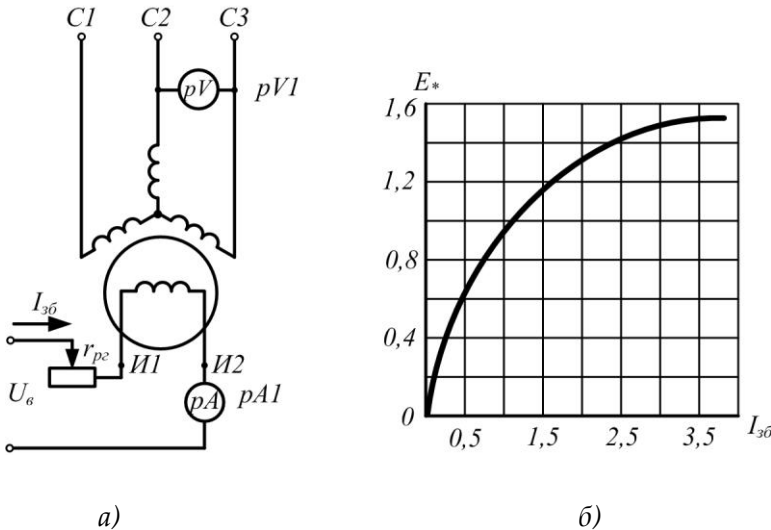


Рис. 5.18 – Дослід холостого ходу синхронного генератора

При цьому МРС обмотки збудження має як би дві складові: одна компенсує падіння напруги $j \dot{I}_1 x_1$, а інша компенсує розмагнічувальний вплив реакції якоря $j \dot{I}_d x_{ad}$.

Характеристики к.з. і х.х. дають можливість визначити значення струмів збудження, відповідні вказаним складовим МРС збудження. З цією метою характеристики х.х. і к.з. будують в одних осях, при цьому на осі ординат відзначають відносні значення напруги х.х. $E^* = E_0 / U_{1ном}$ і струму к.з. $I_k^* = I_{1к} / I_{1ном}$. На осі ординат відкладають

відрізок ОВ, що виражає в масштабі напруги відносне значення ЕРС розсіяння $\dot{E}_{\sigma 1*} = -j \dot{I}_1 x_1 / U_{1ном}$. Потім точку В зносять на характеристику х.х. (точка В') і опускають перпендикуляр В'Д на вісь абсцис. Отримана точка Д розділила струм збудження $I_{зб0ном}$ на дві частини: $I_{збх}$ – струм збудження, необхідний для компенсації падіння напруги $j \dot{I}_1 x_1$ і $j \dot{I}_{збд}$ – струм збудження, що компенсує повздовжньо-розмагнічувальну реакцію якоря.

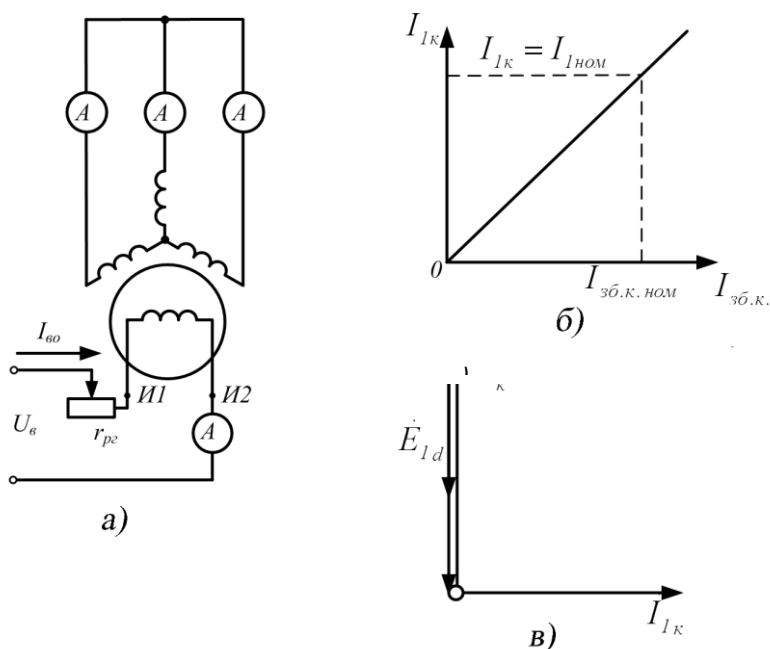


Рис. 5.19 – Дослід короткого замикання синхронного генератора

Один з важливих параметрів синхронної машини – відношення короткого замикання (ОКЗ), яке є відношенням струму збудження $I_{зб0ном}$, відповідного номінальній напрузі при х.х., до струму збудження $I_{зб.к.ном}$, відповідного номінальному струму статора при досліді к.з. (рис. 5.19, б)

$$ОКЗ = I_{зб0ном} / I_{зб.к.ном} \quad (5.14)$$

Для турбогенераторів $OK3=0,4-0,7$; для гідрогенераторів $OK3 = 1,0-1,4$.

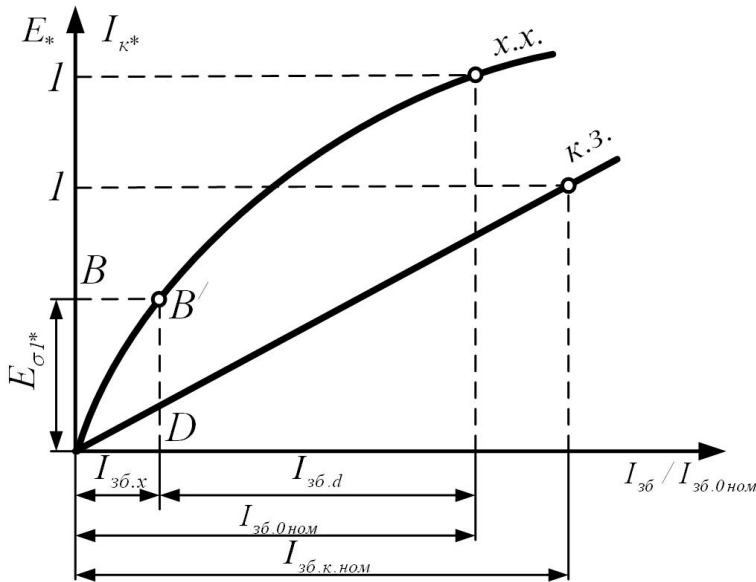


Рис. 5.20 – Визначення складових струму короткого замикання

$OK3$ має велике практичне значення при оцінці властивостей синхронної машини: машини з малим $OK3$ менш стійкі при паралельній роботі, мають значні коливання напруги при змінах навантаження, але такі машини мають менші габарити і, отже, мають меншу вартість, ніж машини з великим $OK3$.

Зовнішня характеристика

Зовнішня характеристика – залежність напруги на виводах обмотки статора від струму навантаження: $U_1 = f(I_1)$ при $I_{зб} = const$; $\cos\phi_1 = const$; $n_1 = n_{ном} = const$. На рисунку 5.21, а представлені зовнішні характеристики, відповідні різним за характером навантаженням синхронного генератора.

При активному навантаженні ($\cos\phi_1=1$) зменшення струму навантаження I_1 супроводжується зростанням напруги U_1 , що пояснюється зменшенням падіння напруги в обмотці статора і ослабленням розмагнічувальної дії реакції якоря по поперечній осі. При індуктивному навантаженні ($\cos\phi_1 < 1$; інд.) збільшення U_1 при

скиданні навантаження інтенсивніше, оскільки із зменшенням струму I_1 послаблюється розмагнічувальна дія подовжньої складової реакції якоря. Проте у разі ємнісного навантаження генератора ($\cos\varphi_1 < 1$; ємн.) зменшення I_1 супроводжується зменшенням напруги U_1 , що пояснюється ослабленням підмагнічувальної дії подовжньої складової реакції якоря.

Зміна напруги синхронного генератора, викликана скиданням номінального навантаження при $I_{\Sigma 0} = \text{const}$ і $n_1 = \text{const}$, називається номінальною зміною (підвищенням) напруги (%)

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0 - U_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 \quad (5.15)$$

При ємнісному навантаженні генератора скидання навантаження викликає зменшення напруги, а тому $\Delta U_{\text{ном}}$ має негативний знак.

В процесі експлуатації синхронного генератора напруга U_1 при коливаннях навантаження підтримується незмінною за допомогою швидкодіючих автоматичних регуляторів. Проте, щоб уникнути пошкодження ізоляції обмотки, $\Delta U_{\text{ном}}$ не повинно перевищувати 50%.

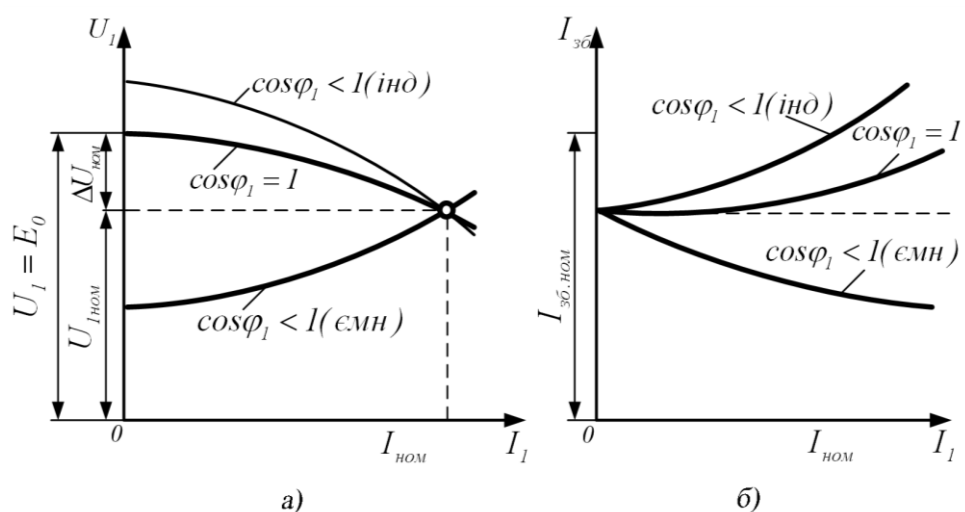


Рис. 5.21 – Зовнішні (а) і регульовальні (б) характеристики синхронного генератора

Регульовальна характеристика

Регульовальна характеристика показує, як слід змінювати струм збудження генератора при зміні навантаження, щоб напруга на затисках генератора залишалася незмінною: $I_{зб}=f(I_1)$ при $U_1=U_{1ном}=const$; $n_1=n_{ном}=const$ та $\cos\varphi_1=const$. На рисунку 5.21, б наведені регульовальні характеристики синхронного генератора. При активному навантаженні ($\cos\varphi_1=1$) збільшення струму навантаження супроводжується зниженням напруги U_1 , тому слід підвищувати струм збудження. Індуктивний характер навантаження ($\cos\varphi_1<1$; інд.) викликає більш різке зниження напруги U_1 (рис. 5.21, а), тому струм збудження $I_{зб}$ необхідний для підтримки $U_1=U_{1ном}$, слід підвищувати більше. При ємнісному навантаженні ($\cos\varphi_1<1$; ємн.) збільшення навантаження супроводжується зростанням напруги U_1 , тому для підтримки $U_1=U_{1ном}$ струм збудження $I_{зб}$ необхідно зменшувати.

5.7 ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

На електричних станціях зазвичай встановлюють декілька синхронних генераторів, що включаються паралельно для спільної роботи (рис. 5.22). Наявність декількох генераторів замість одного сумарної потужності дає переваги, обґрунтовані тими ж міркуваннями, які були викладені стосовно паралельної роботи трансформаторів.

При включенні синхронного генератора в мережу на паралельну роботу необхідно дотримуватись наступних умов: ЕРС генератора E_0 у момент підключення його до мережі має бути рівна і протилежна по фазі напрузі мережі ($\dot{E}_M = -\dot{U}_M$), частота ЕРС генератора f_G має дорівнювати частоті змінної напруги в мережі f_M ; порядок проходження фаз на виводах генератора має бути таким же, що і на затисках мережі.

Приведення генератора в стан, що задовольняє всі вказані умови, називають синхронізацією. Недотримання будь-якої з умов синхронізації приводить до появи в обмотці статора великих зрівняльних струмів, надмірне значення яких може стати причиною аварії.

Включити генератор в мережу з паралельно працюючими генераторами можна або способом точної синхронізації, або способом самосинхронізації.

Спосіб точної синхронізації

Суть цього способу полягає в тому, що перш ніж включити генератор в мережу, його приводять в стан, що відповідає всім вище переліченим умовам. Момент дотримання цих умов, тобто момент синхронізації, визначають приладом, що зветься синхроскопом. За конструкцією синхроскопи поділяють на стрілочні і лампові. Розглянемо процес синхронізації генераторів із застосуванням лампового синхроскопа, який складається з трьох ламп 1, 2, 3, розташованих у вершинах рівностороннього трикутника.

При включенні ламп за схемою “на згасання” (рис. 5.23, а) момент синхронізації відповідає одночасному згасанню всіх ламп. Припустимо, що зірка ЕДС генератора $\dot{E}_A; \dot{E}_B; \dot{E}_C$ обертається з кутовою частотою ω_A , що перевищує кутову частоту обертання ω_l зірки напруги мережі $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$. В цьому випадку напруга на лампах визначається геометричною сумою $\dot{E}_A + \dot{U}_A; \dot{E}_B + \dot{U}_B; \dot{E}_C + \dot{U}_C$ (рис. 5.23, б).

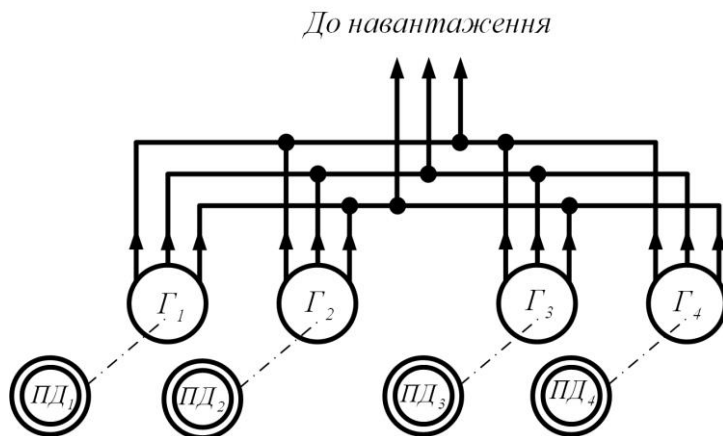


Рис. 5.22 – Включення синхронних генераторів на паралельну роботу: Г1–Г4 – синхронні генератори, ПД1–ПД4 – привідні двигуни

У момент збігу векторів зірки ЕРС з векторами зірки напруги ця сума досягає найбільшого значення, при цьому лампи горять з найбільшим напруженням (напруга на лампах дорівнює подвоєній напрузі мережі). У подальші моменти часу зірка ЕРС обганяє зірку напруги, і напруга на лампах зменшується. У момент синхронізації вектори ЕРС і напруги займають положення, при якому $\dot{E}_A + \dot{U}_A = 0$; $\dot{E}_B + \dot{U}_B = 0$; $\dot{E}_C + \dot{U}_C = 0$, тобто $U_{\Delta} = 0$, і всі три лампи одночасно гаснуть (рис. 5.23, в). При великій різниці кутових частот ω_A і ω_1 лампи спалахують часто. Змінюючи частоту обертання первинного двигуна, добиваються рівності $\omega_A = \omega_1$, про що свідчитиме згасання ламп на тривалий час. У цей момент і слід замкнути рубильник, після чого генератор виявиться підключеним до мережі.

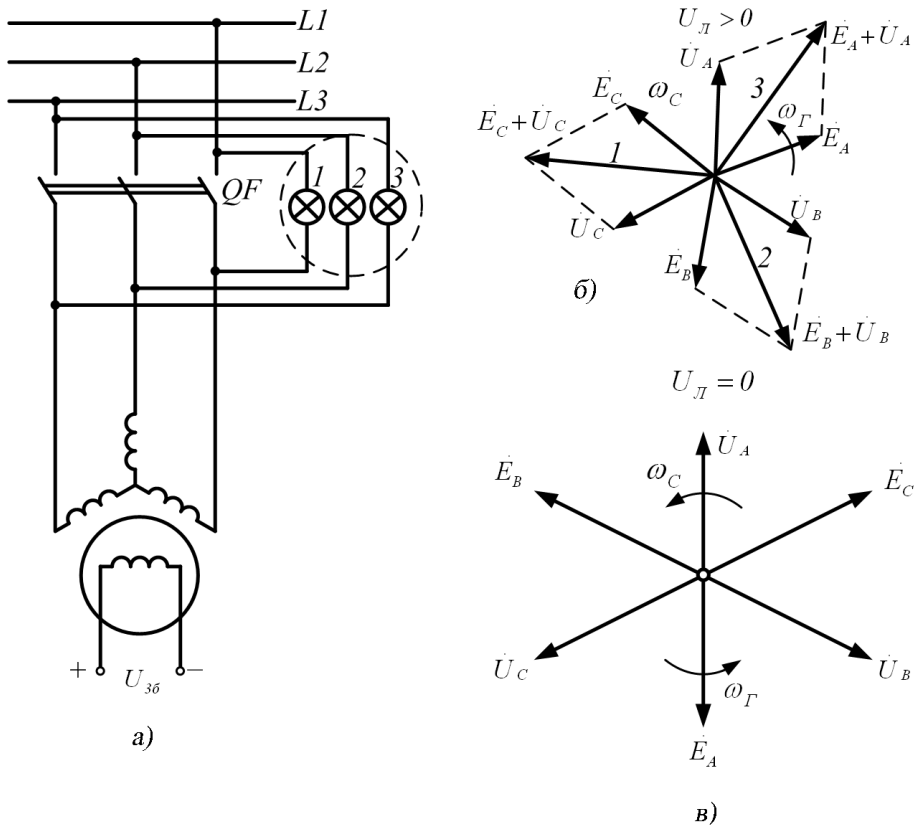


Рис. 5.23 – Ламповий синхроскоп

Спосіб самосинхронізації

Ротор незбудженого генератора приводять в обертання первинним двигуном до частоти обертання, що відрізняється від синхронної не більше ніж на 2–5%, потім генератор підключають до мережі. Для того, щоб уникнути перенапружень в обмотці ротора у момент підключення генератора до мережі, її замикають на деякий активний опір. Оскільки у момент підключення генератора до мережі його ЕРС дорівнює нулю (генератор не збуджений), то під дією напруги мережі в обмотці статора спостерігається різкий кидок струму, що перевищує номінальне значення струму генератора. Після включення обмотки статора в мережу підключають обмотку збудження до джерела постійного струму і синхронний генератор під дією електромагнітного моменту, що діє на його ротор, втягується в синхронізм, тобто частота обертання ротора стає синхронною. При цьому струм статора швидко зменшується.

При самосинхронізації в генераторі протікають складні електро-механічні перехідні процеси, що викликають значні механічні дії на обмотки, підшипники і муфту, що з'єднує генератор з турбіною. Вплив цих дій на надійність генератора враховується при проектуванні синхронних генераторів. Спосіб самосинхронізації (грубої синхронізації) зазвичай застосовують в генераторах при їх частих включеннях. Цей спосіб простий і легко автоматизується.

Режим роботи синхронного генератора

Зазвичай спільно на одну мережу працюють декілька синхронних генераторів і потужність будь-якого з них набагато менше сумарної потужності решти всіх генераторів. Вважатимемо, що синхронний генератор підключають на паралельну роботу з іншими генераторами, сумарна потужність яких настільки велика в порівнянні з потужністю генератора, що підключається, що при будь-яких змінах параметрів цього генератора напруга мережі U_M і її частота f_M залишаються незмінними.

Після підключення генератора в мережу при дотриманні всіх умов синхронізації його ЕРС E_0 рівна за значенням і протилежна по фазі напрузі мережі (рис. 5.24, а), тому струм в ланцюзі генератора дорівнює нулю, тобто генератор працює без навантаження. Механічна

потужність приводного двигуна P_1 в цьому випадку повністю витрачається на покриття втрат х. х.: $P_0 = P_{\text{мех}} + P_{\text{маг.}} + P_{\text{зб.}} + P_{\text{п.}}$

Відсутність струму в обмотці статора синхронного генератора приводить до того, що обмотка статора не створює магнітного поля, що обертається, і в генераторі діє лише магнітне поле збудження, що обертається разом з ротором з кутовою частотою ω_1 , але не створює електромагнітного моменту.

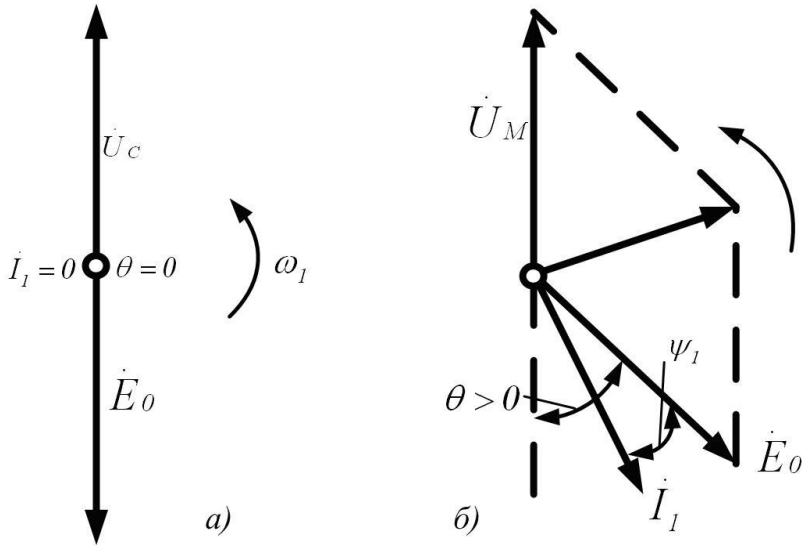


Рис. 5.24 – Векторні діаграми синхронного генератора, включеного на паралельну роботу в мережу великої потужності: а) – при роботі без навантаження; б) – при роботі з навантаженням

Якщо ж збільшити момент M_1 приводного двигуна, що обертає, то ротор машини, одержавши деяке прискорення, зміститься щодо свого первинного положення на кут θ у напрямі обертання. На такий же кут θ виявиться зрушений вектор ЕРС генератора $\dot{E}_0$ щодо свого положення, відповідного режиму х.х. генератора (рис. 5.25, б). В результаті в ланцюзі статора з'явиться результуюча ЕРС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{U}_C$, яка створить в ланцюзі обмотки статора генератора струм I_1 . Якщо нехтувати активним опором обмотки статора і вважати опір цієї обмотки чисто індуктивним, то

струм I_1 відстає по фазі від $\Delta \dot{E}$ на кут 90° (рис. 5.24, б) і відстає по фазі від ЕРС E_0 на кут ψ_1 .

Струм I_1 створює магнітне поле, що обертається синхронно з ротором і що створює разом з полем ротора результуюче магнітне поле синхронної машини. Вісь цього результуючого поля $d'-d'$ не збігається з подовжною віссю полюсів ротора $d-d$: у синхронному генераторі вісь полюсів ротора $d-d$ випереджає вісь результуючого поля машини $d'-d'$ на кут θ (рис. 5.25, а).

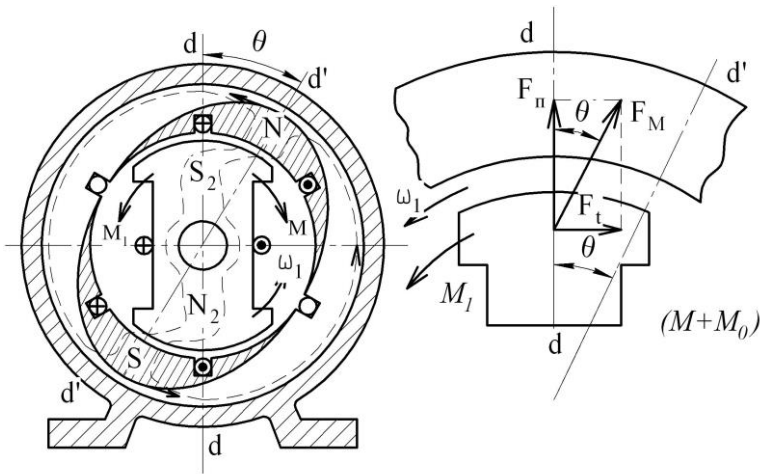


Рис. 5.25 – До поняття про електромагнітний момент синхронного генератора

Відомо, що різноіменні магнітні полюси взаємно притягуються, тому між намагніченими полюсами ротора і неявно вираженими полюсами поля статора, що обертається, виникають сили магнітного тяжіння F_M . Вектор цієї сили на кожному полюсі ротора, направлений під кутом θ до осі полюса, має дві складові: $F_n = F_M \cos \theta$ – нормальна складова, направлена по осі полюсів, і $F_t = F_M \sin \theta$ – тангенціальна складова, направлена перпендикулярно осі полюсів ротора. Сукупність тангенціальних складових F_t на всіх полюсах ротора створює на роторі синхронного генератора електромагнітний момент, направлений до магнітного поля, що зустрічно обертається

$$M = F_t 2p(D_2 / 2) = F_M D_2 p \sin \theta, \quad (5.16)$$

де D_2 – діаметр ротора.

З отриманого виразу виходить, що електромагнітний момент синхронної машини є синусоїдальною функцією кута θ і може бути представлений виразом

$$M = M_{\max} \sin \theta, \quad (5.17)$$

де $M_{\max}$ – максимальне значення електромагнітного моменту, відповідне значенню кута $\theta=90$ ел. град.

Електромагнітний момент M , що виникає на роторі генератора, направлений до моменту приводного двигуна, що зустрічно обертається M_1 , тобто він є гальмуючим моментом. На подолання цього моменту витрачається частина потужності приводного двигуна, яка є електромагнітною потужністю

$$P_{EM} = M\omega_1, \quad (5.18)$$

де ω_1 – кутова частота обертання ротора.

Таким чином, з появою струму I_1 в обмотці статора синхронного генератора, що працює паралельно з мережею, генератор отримує електричне навантаження, а приводний двигун (турбіна, дизельний двигун і т. п.) отримує додаткове механічне навантаження. При цьому механічна потужність приводного двигуна P_1 витрачається не тільки на покриття втрат х.х. генератора P_0 , але і частково перетворюється в електромагнітну потужність генератора P_{EM} , тобто

$$P_1 = P_0 + P_{EM} \quad (5.19)$$

Отже, електромагнітна потужність синхронного генератора є електричною активною потужністю, перетвореною з частини механічної потужності приводного двигуна

$$P_{EM} = P_1 - P_0 \quad (5.20)$$

Що ж до активної потужності на виході синхронного генератора P_2 , що віддається генератором в мережу, тобто

$$P_2 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \cdot 10^{-3}, \quad (5.21)$$

то вона менше електромагнітної потужності P_{EM} на значення, рівне сумі електричних втрат в обмотці статора $P_{E1} = m_1 I_1^2 r_1$ і додаткових втрат $P_{\text{доо}}$ при навантаженні

$$P_2 = P_{EM} - (P_{E1} + P_{\text{доо}}). \quad (5.22)$$

Отже, потужність на виході синхронного генератора P_2 (активне навантаження) при його паралельній роботі з мережею регулюється зміною моменту M_1 приводного двигуна, що обертає

$$P_2 = P_1 - \sum P = M_1 \omega_1 - \sum P, \quad (5.23)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1 / p = \text{const}$ – кутова синхронна швидкість обертання ротора синхронної машини, рад/с.

Якщо всі складові рівняння (5.19) розділити на кутову частоту $P_1 / \omega_1 = P_0 / \omega_1 + P_{A\dot{t}} / \omega_1$, то отримаємо рівняння моментів

$$M_1 = M_0 + M \quad (5.24)$$

З цього рівняння виходить обертальний момент M_1 , що розвивається приводним двигуном на валу генератора, дорівнює сумі протидіючих моментів: моменту х. х. M_0 , обумовленого втратами х. х. P_0 і електромагнітного моменту M , обумовленого навантаженням генератора.

Момент х. х. M_0 для даного генератора постійний ($M_0 = \text{const}$), тому навантаження синхронного генератора можливе лише за рахунок моменту приводного двигуна, що обертає, коли його значення перевищує момент х. х., тобто при $M_1 > M_0$.

Раніше ми розглядали паралельну роботу синхронного генератора при незмінному струмі збудження. Що ж відбудеться в синхронному генераторі, якщо після підключення його до мережі для паралельної роботи змінити струм в його обмотці збудження, залишивши незмінним момент приводного двигуна, що обертає? Припустимо, що генератор після підключення на мережу працює без навантаження і його ЕРС $\dot{E}_0$ врівноважує напругу мережі $\dot{U}_M$. Якщо збільшити струм в обмотці збудження, тобто перезбудити машину, то ЕДС $\dot{E}_0$ збільшиться до значення $\dot{E}'_0$ і в ланцюзі генератора з'явиться надмірна ЕРС $\Delta \dot{E} = \dot{E}'_0 - \dot{U}_C$ (рис. 5.26, а), вектор якої збігається за напрямом з вектором ЕРС $\dot{E}_0$. Струм $\dot{I}_d$, викликаний ЕРС $\Delta \dot{E}$, відставатиме від неї по фазі на 90° (оскільки $r_1 \approx 0$). По відношенню до ЕРС $\dot{E}_0$ цей струм також буде таким, що відстає (індуктивним). Із збільшенням перезбудження значення реактивного (індуктивного) струму збільшиться. Якщо ж після того, як генератор підключений до

мережі, зменшити струм збудження, тобто недозбудить машину, то ЕРС $\dot{E}_0$ зменшиться до значення $\dot{E}_0''$ і в ланцюзі генератора знову діятиме надмірна ЕРС $\Delta\dot{E} = \dot{U}_i$. Тепер вектор цієї ЕРС збігатиметься за напрямом з вектором напруги мережі $\dot{U}_i$ (рис. 5.26, б) і тому струм $\dot{I}_d$, викликаний цією ЕРС і що відстає від неї по фазі на 90° , буде таким, що випереджає (ємнісним) по відношенню до ЕРС генератора $\dot{E}_0$.

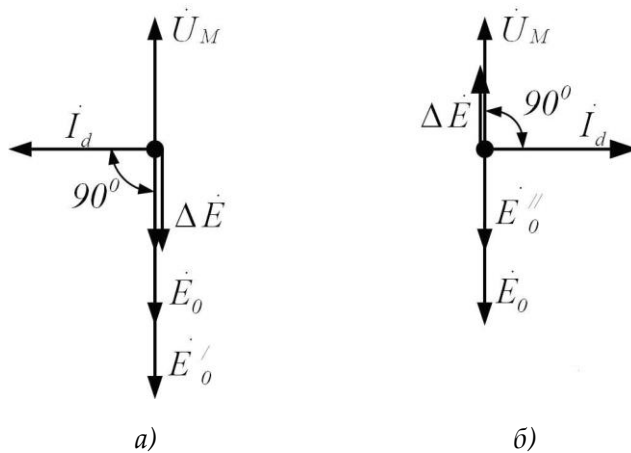


Рис. 5.26 – Векторні діаграми ЕРС синхронного генератора, включеного на паралельну роботу

Це супроводиться появою в обмотці статора реактивного струму $\dot{I}_d$, який по відношенню до ЕРС є таким, що відстає (індуктивним). Викликана цим струмом подовжньо-розмагнічувальна реакція якоря компенсує надмірну МРС збудження так, що ЕРС генератора залишається незмінною. Такий же процес відбувається і при недозбудженні генератора з тією лише різницею, що в обмотці з'являється випереджальний (ємнісний) струм $\dot{I}_d$ а викликана цим струмом реакція якоря, що подовжньо намагнічує, компенсує відсутню МРС збудження.

Слід мати на увазі, що струм $\dot{I}_d$, що відстає по фазі від ЕРС $\dot{E}_0$ по відношенню до напруги мережі $\dot{U}_i$ є випереджальним струмом і, навпаки, струм $\dot{I}_d$, що випереджає по фазі ЕРС $\dot{E}_0$, є таким, що відстає по відношенню до напруги $\dot{U}_M$.

Якщо при всіх змінах струму збудження момент приводного двигуна, що обертає, залишається незмінним, то також незмінною залишається активна потужність генератора

$$P_2 = m_1 U_C I_1 \cos \varphi_1 = \text{const} \quad (5.25)$$

З цього виразу виходить, що при $U_C = \text{const}$ активна складова струму статора $I_q = I_1 \cos \varphi_1 = \text{const}$.

Таким чином, ступінь збудження синхронного генератора впливає тільки на реактивну складову струму статора. Що ж до активної складової струму $I_q = I_1 \cos \varphi_1$, то вона залишається незмінною.

Залежність струму статора I_1 від струму в обмотці збудження $I_{зб}$ при незмінному активному навантаженні генератора виражається графічно U-подібною кривою. На рисунку 5.27 представлені U-подібні характеристики $I_1 = f(I_{зб})$ при $P_2 = \text{const}$, побудовані для різних значень активного навантаження: $P_2 = 0$; $P_2 = 0,5 P_{ном}$ і $P_2 = P_{ном}$. U-подібні характеристики синхронного генератора показують, що будь-якому навантаженню генератора відповідає таке значення струму збудження I'_B , при якому струм статора I_1 стає мінімальним і рівним тільки активній складовій: $I_{1\min} = I_1 \cos \varphi_1 = I_q$. В цьому випадку генератор працює при коефіцієнті потужності $\cos \varphi_1 = 1$. Значення струму збудження, відповідні $\cos \varphi_1 = 1$ при різному навантаженні генератора, показані на рисунку 5.27 пунктирною кривою. Деяке відхилення цієї кривої управо указує на те, що при збільшенні навантаження струм збудження, відповідний $\cos \varphi_1 = 1$, дещо зростає. Пояснюється це тим, що при зростанні навантаження необхідне деяке збільшення струму збудження, що компенсує активне падіння напруги.

U-подібні характеристики синхронного генератора

Необхідно мати на увазі, що при поступовому зменшенні струму збудження настає таке мінімальне його значення, при якому магнітний потік обмотки збудження виявляється настільки ослабленим, що синхронний генератор випадає з синхронізму – порушується магнітний зв'язок між збудженими полюсами ротора і полем статора, що обертається. Якщо з'єднати всі точки мінімально допустимих значень струму збудження на U-подібних характеристиках (штрихова

лінія в лівій частині рисунку 5.27), то отримаємо лінію межі стійкості роботи синхронного генератора при недозбудженні.

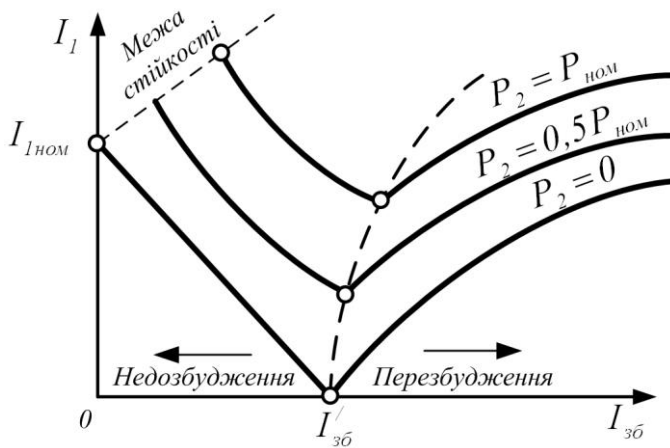


Рис. 5.27 – U-подібні характеристики синхронного генератора

З погляду зменшення втрат генератора найбільш вигідним є збудження, відповідне мінімальному струму статора, тобто коли $\cos \varphi_1 = 1$. Але в більшості випадків навантаження генератора має індуктивний характер і для компенсації індуктивних струмів (що відстають по фазі від напруги мережі) доводиться перезбуджувати генератор, створюючи умови, при яких струм статора $\dot{I}_1$ випереджає по фазі напругу мережі $\dot{U}_1$. Слід зазначити, що для збереження $\cos \varphi_1$ незмінним при змінах активного навантаження генератора, потрібна одночасна зміна струму збудження генератора.

5.8 СИНХРОННІ ДВИГУНИ І КОМПЕНСАТОРИ

Синхронні двигуни

Відповідно до принципу оборотності електричних машин синхронна машина може працювати не тільки в режимі генератора, але і в режимі двигуна, тобто споживати з мережі електричну енергію і перетворювати її в механічну.

Для пояснення принципу роботи синхронного двигуна уявимо собі синхронний генератор, включений на паралельну роботу в мережу великої потужності.

Припустимо, приводний двигун обертає ротор генератора проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю ω_1 . При цьому навантаження генератора таке, що подовжня вісь полюсів ротора $d-d'$ зміщена щодо осі поля, що обертається $d'-d''$ на кут θ' у напрямі обертання ротора (рис. 5.28, справа). Момент приводного двигуна, що обертає M_1' врівноважується сумою електромагнітного моменту генератора M' і моменту х.х. M_0 ($M_1' = M' + M_0$). На кутовій характеристиці цьому режиму генератора відповідає точка Р.

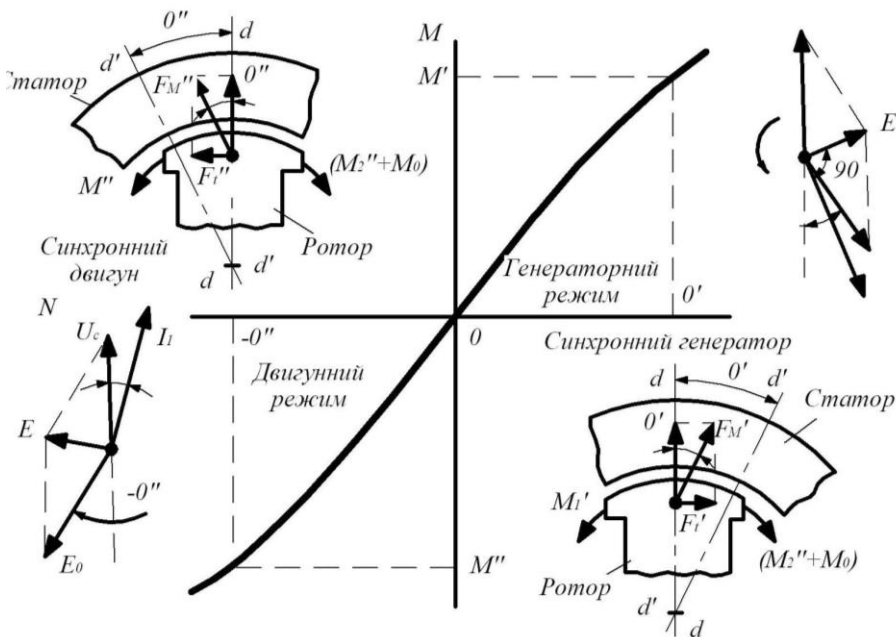


Рис. 5.28 – Перехід синхронної машини з генераторного режиму в режим двигуна

Якщо зменшувати момент, що обертає M_1' , то навантаження генератора почне також зменшуватися, при цьому зменшуватиметься кут θ' , а отже, і струм статора I_1 . У результаті знизиться величина електромагнітного моменту M' і при моменті, що обертає $M_1' = M_0$, кут $\theta = 0$, тобто генератор працюватиме в режимі х. х. ($I_1 = 0$) і ЕРС генератора E_0 опиниться в протифазі з напругою мережі U_c . Цьому

режиму на кутовій характеристиці відповідає точка перетину осей координат (точка 0 на рисунку 5.28).

Якщо ж вал синхронної машини від'єднати від приводного двигуна і створити на цьому валу гальмівний момент, тобто момент навантаження M_2 , направлений зустрічно обертанню ротора машини, то відбудеться зсув вектора ЕРС $\dot{E}_0$ на кут $-\theta$ щодо його положення в режимі х. х. у бік відставання (рис. 5.28, зліва).

При цьому в ланцюзі обмотки статора з'явиться результуюча ЕРС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{U}_C$, яка створює в обмотці статора струм $\dot{I}_1$, що відстає по фазі від ЕРС $\Delta \dot{E}$ на кут 90° (передбачається $r_1 \approx 0$) і що відстає по фазі від напруги мережі $\dot{U}_C$ на кут φ_1 (у генераторному режимі струм $\dot{I}_1$ відстає по фазі від ЕРС E_0 на кут ψ_1).

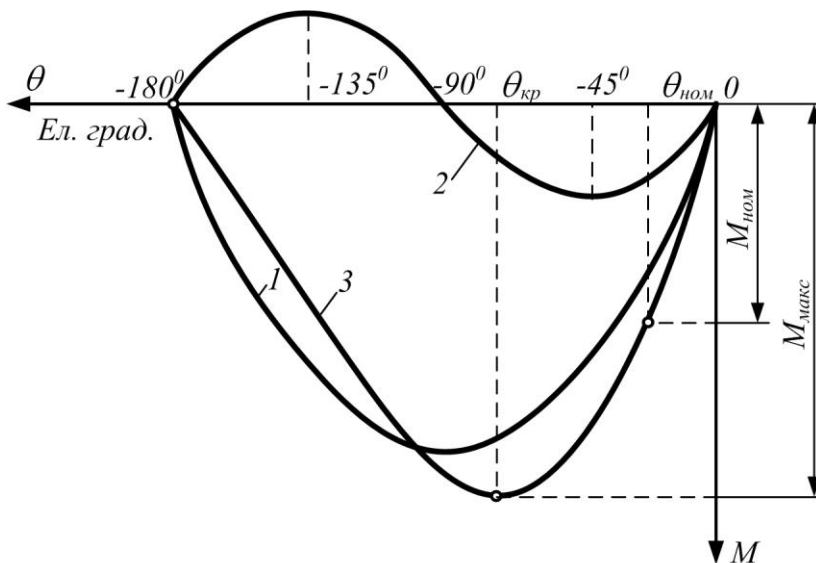


Рис. 5.29 – Кутова характеристика синхронного двигуна

Струм I_1 створює магнітне поле, що обертається синхронно з ротором, вісь якого $d'-d'$ зміщена щодо подовжньої осі полюсів ротора $d-d$ на кут $-\theta$. Припустимо, робота двигуна відбувається в режимі точки Д на кутовій характеристиці (рис. 5.29, зліва), що відповідає куту $-\theta''$. Виниклі при цьому тангенціальні складові сил магнітної взаємодії полюсів $F_t'' = F_M'' \sin \theta''$ створять на роторі двигуна електромагнітний момент M'' , направлений згідно з магнітним полем,

що обертає, і ротор, що приводить в обертання з синхронною частотою ω_1 .

При цьому синхронна машина споживатиме з мережі електричну енергію і перетворюватиме її в механічну енергію обертання. Електромагнітний момент M'' , що обертає, долає момент х. х. M_0 і створює на валу двигуна корисний момент M_2'' , під дією якого приводиться в обертання виконавчий механізм

$$M' = M_0 + M_2'' \quad (5.26)$$

Всі значення моменту на кутовій характеристиці синхронного двигуна відкладаються в негативному напрямі осі ординат, оскільки під час переходу синхронної машини з генераторного режиму в руховий електромагнітний момент міняє свій напрям. Також негативною стає потужність синхронного двигуна, яка надходить з мережі в машину, а не з машини в мережу, як це відбувається в генераторному режимі. Операції з негативними значеннями потужностей і моментів украй незручної, тому при розгляді синхронних двигунів умовно прийматимемо моменти і потужності позитивними, пам'ятаючи при цьому викладене раніше про напрям цих параметрів.

Кутові характеристики електромагнітного моменту $M = f(\theta)$ і його складових $M_{осн} = f(\theta)$ і $M_p = f(\theta)$ представлені на рисунку 5.29. Ці характеристики відрізняються від кутових характеристик генератора лише тим, що розташовуються в третьому квадранті осей координат, тобто визначаються негативними значеннями кутів θ і моментів M і $M_{осн}$, а також моменту M_p при $\theta = 0 \div (-90^\circ)$.

Таким чином, в загальному вигляді кутова характеристика синхронної машини є двома півхвилями результуючого моменту M : позитивною, відповідною генераторному режиму роботи, і негативною, відповідною руховому режиму роботи (рис. 5.29). Перехід машини з одного режиму роботи в інший відбувається при $\theta = 0$.

Стійка робота синхронного двигуна відповідає ділянці кутової характеристики при $\theta = 0 \div (\theta_{кр})$.

Відношення максимального електромагнітного моменту M_{max} до номінального $M_{ном}$ визначає перевантажувальну здатність синхронного двигуна

$$\lambda = M_{max} / M_{ном} \quad (5.27)$$

Зазвичай переважувальна здатність синхронних двигунів $\lambda = 2 \div 3$, що при номінальному навантаженні двигуна відповідає $\theta_{ном} = 30 \div 20$ ел. град.

Ротор синхронного двигуна може обертатися тільки з синхронною частотою $n_1 = f_1 60 / p$. Щоб переконатися в цьому, досить припустити, що ротор двигуна почне обертатися з частотою $n_2 < n_1$. У якийсь момент часу намагнічені полюси ротора розташуються проти однойменних полюсів магнітного поля статора, що обертається, і тоді порушиться магнітний зв'язок між намагніченими полюсами ротора і полюсами поля статора, що обертається, оскільки їх однойменні полюси взаємно відштовхуватимуться і ротор, припинивши зазнавати стійкої дії електромагнітного моменту, що обертає, зупиниться.

Обертання ротора синхронних двигунів тільки з синхронною частотою є характерною особливістю цих двигунів і часто визначає сферу їх застосування (наприклад, для приводу пристроїв, що вимагають стабільної частоти обертання).

При змінах навантаження на валу синхронного двигуна міняється кут θ . При цьому ротор унаслідок інерції має агрегату, що обертаються, не відразу займає положення, відповідні новому навантаженню, а якийсь час здійснює коливальні рухи. Таким чином, в синхронному двигуні, так само як і в генераторі, мають місце коливання ротора.

За своєю конструкцією синхронні двигуни в принципі не відрізняються від синхронних генераторів, але все-таки мають деякі особливості. Їх виготовляють переважно явнополюсними з $2p = 6 \div 24$ полюсів; повітряний зазор роблять меншим, ніж в генераторах такої ж потужності, що сприяє поліпшенню ряду параметрів двигуна, зокрема зменшенню пускового струму; демпферну (заспокійливу) обмотку виконують стрижнями більшого перетину, оскільки при пуску двигуна вона є пусковою обмоткою; ширина полюсного наконечника досягає $0,9\tau$ замість $0,7\tau$ у генераторах. Тому, не дивлячись на властивість оборотності, синхронні машини, що випускаються промисловістю, мають зазвичай цільове призначення — або це синхронні генератори, або синхронні двигуни.

Пуск синхронного двигуна безпосереднім включенням в мережу неможливий, оскільки ротор із-за своєї значної інерції не може бути відразу захоплений полем статора, що обертається, частота обертання якого встановлюється миттєво. В результаті стійкий магнітний зв'язок

між статором і ротором не виникає. Для пуску синхронного двигуна доводиться застосовувати спеціальні способи, суть яких полягає в попередньому приведенні ротора в обертання до синхронної або близької до неї частоти, при якій між статором і ротором встановлюється стійкий магнітний зв'язок.

В даний час практичне застосування має спосіб пуску, що отримав назву асинхронного. Цей спосіб пуску можливий за наявності в полюсних наконечниках ротора пускової обмотки (клітки), аналогічній заспокійливій обмотці синхронного генератора. Схема включення двигуна при цьому способі пуску наведена на рисунок 5.30, а. Незбуджений синхронний двигун включають в мережу. Виникле при цьому магнітне поле статора, що обертається, наводить в стрижнях пускової клітки ЕРС, які створюють струми I_2 .

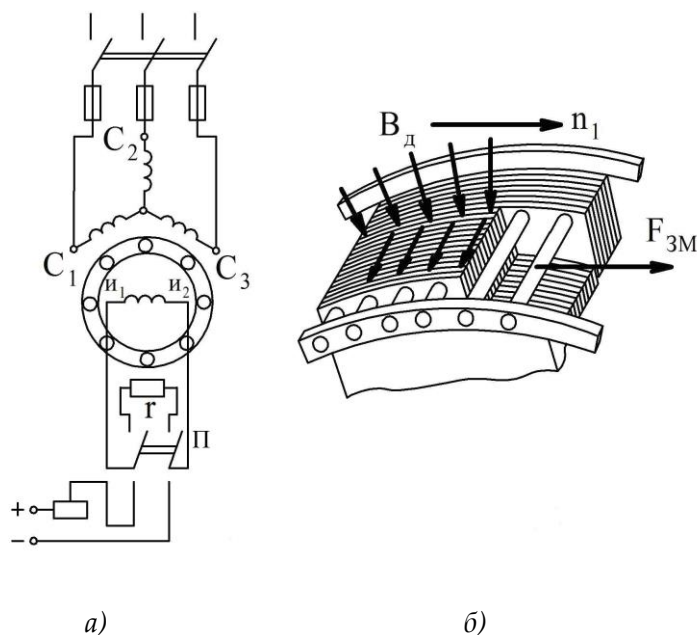


Рис. 5.30 – Асинхронний пуск синхронного двигуна

Взаємодія цих струмів з полем статора викликає появу на стрижнях пускової клітки електромагнітних сил F_{EM} . Під дією цих сил ротор приводиться в обертання (рис. 5.30, б). Після розгону ротора до частоти обертання, близької до синхронної ($n_2 \approx 0,95n_1$), обмотку збудження підключають до джерела постійного струму. Синхронний

момент, що утворюється при цьому, втягує ротор двигуна в синхронізм. Після цього пускова обмотка двигуна виконує функцію заспокійливої обмотки, обмежуючи гойдання ротора.

Чим менше навантаження на валу двигуна, тим легше його входження в синхронізм. Явнополюсні двигуни малої потужності, що пускаються без навантаження на валу, іноді входять в синхронізм лише за рахунок реактивного моменту, тобто навіть без включення обмотки збудження.

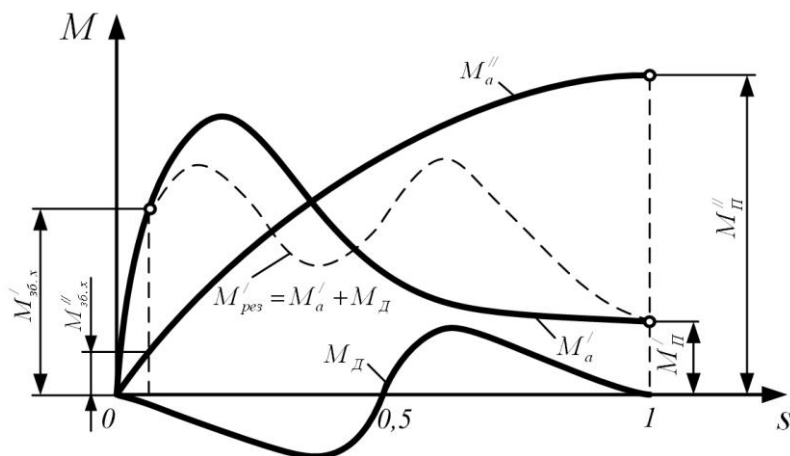
Із збільшенням моменту навантаження на валу входження двигуна в синхронізм важче. Найбільший момент навантаження, при якому ротор синхронного двигуна ще втягується в синхронізм, називають моментом входу двигуна в синхронізм $M_{\text{вх}}$. Величина асинхронного моменту M_a при частоті обертання $n_2 \approx 0,95n_1$ залежить від активного опору пускової клітки, тобто від перетину стрижнів і питомого електричного опору металу, з якого вони виготовлені.

Слід звернути увагу, що вибір опору пускової клітки r_2'' відповідного значному пусковому моменту (M'') сприяє зменшенню моменту входу в синхронізм ($M_{\text{вх}}''$) і, навпаки, при опорі r_2' відповідному невеликому пусковому моменту (M_n'), момент входу в синхронізм збільшується ($M_{\text{вх}}' > M_{\text{вх}}''$) (рис. 5.31).

В процесі асинхронного пуску обмотку збудження не можна залишати розімкнутою, оскільки магнітний потік статора, що перетинає її в початковий період пуску з синхронною швидкістю, наводить в ній ЕРС. Унаслідок великого числа витків обмотки збудження ця ЕРС досягає значень, небезпечних як для цілості ізоляції самої обмотки, так і для обслуговуючого персоналу. Для запобігання цьому обмотку збудження на період розгону ротора замикають на активний опір приблизно вдесятеро більше опору обмотки збудження. Перемикання затисків I_1 і I_2 обмотки збудження з опору r на затиски збудника здійснюють перемикачем П (рис 5.30, а).

Замикання накоротко обмотки збудження на час пускання двигуна небажано, оскільки при цьому обмотка ротора утворює однофазний замкнутий контур, взаємодія якого з полем статора, що обертається, також створює додатковий асинхронний момент M_d . Проте при частоті обертання, рівній половині синхронної, цей момент стає гальмуючим (рис. 5.31) і створює “провал” в характеристиці

пускового (асинхронного) моменту (пунктирна крива). Це помітно погіршує пускові властивості синхронного двигуна.



M_a – основний момент; $M_Д$ – додатковий момент $M_{вх}$ – момент входу в синхронізм

Рис. 5.31 – Асинхронні моменти при пуску синхронного двигуна

При асинхронному пуску синхронного двигуна виникає значний пусковий струм. Тому пуск синхронних двигунів безпосереднім включенням в мережу на номінальну напругу застосовують при достатній потужності мережі, здатної витримувати без помітного падіння напруги кидки пускового струму п'яти або семикратного значення (в порівнянні з номінальним струмом). Якщо ж потужність мережі недостатня, то можна застосувати пуск двигуна при зниженій напрузі: автотрансформаторний або реакторний.

Синхронні компенсатори

Синхронний компенсатор (СК) є синхронною машиною, призначеною 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, встановлений на електростанції, а синхронний компенсатор, встановлений в безпосередній близькості до споживача. До споживачів змінного струму, що вимагають значної реактивної потужності, насамперед відносяться асинхронні двигуни. На рисунку 5.32 показана система, що складається з синхронного генератора (СГ), ТПІ, що підвищує, і знижуючого ТПІІ трансформаторів, лінії електропередачі (ЛЕП), споживача Z і синхронного компенсатора (СК), включеного безпосередньо на вході споживача. Синхронний компенсатор, включений в мережу, працює як синхронний двигун без навантаження ($P_2 = 0$), тобто в режимі х. х., і при цьому виробляє реактивну потужність $Q_{СК}$, необхідну для роботи споживача Z , наприклад, групи асинхронних двигунів. Завдяки цьому реактивна потужність в СГ і ЛЕП доведена до деякого мінімального значення $Q_{\min}$. Це сприяє підвищенню техніко-економічних показників всієї електричної системи.

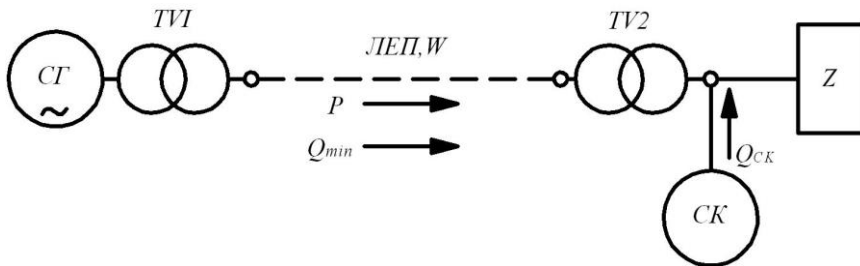


Рис. 5.32 – Схема включення синхронного компенсатора (СК) в електричну систему

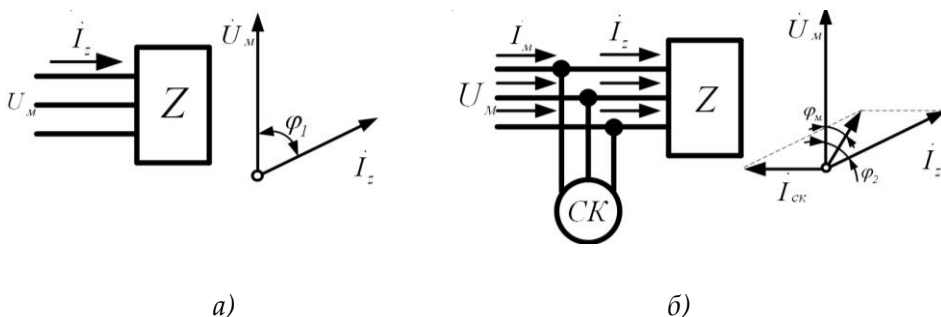


Рис. 5.33 – Застосування синхронного компенсатора для підвищення коефіцієнта потужності мережі

Для пояснення явищ, пов'язаних з підключенням СК до електричної системи, розглянемо рисунок 5.33. При підключенні споживача Z до мережі з напругою $\dot{U}_l$ (рис. 5.33, а) в мережі виникає струм $\dot{I}_z$, що відстає по фазі від $\dot{U}_l$ на кут φ_z , обумовлений значною індуктивною складовою струму $\dot{I}_z$. При підключенні СК паралельно споживачу Z і утворенні в СК режиму перезбудження (рис. 5.33, б) в мережі з'явиться струм $\dot{I}_{СК}$, що випереджає напругу $\dot{U}_l$ на кут 90° . Результуючий струм в мережі

$$\dot{I}_M = \dot{I}_z + \dot{I}_{СК} \quad (3.28)$$

Фазове зрушення цього струму щодо напруги мережі $\dot{U}_l$ (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 таких міркувань. Оскільки СК працює без навантаження на валу, то його активна потужність невелика і визначається втратами х.х. у компенсаторі. Нехтуючи цими втратами, можна активну потужність в мережі до підключення СК

$$P_C = P_Z = \sqrt{3} I_z U_C \cos \varphi_z \quad (5.29)$$

прирівняти до активної потужності мережі після підключення СК

$$P'_C = \sqrt{3} I_c U_C \cos \varphi_C \quad (5.30)$$

Але оскільки $P_C = P'_C$, а $\cos \varphi_C > \cos \varphi_z$, то $I_c < I_z$, в результаті синхронний генератор і лінія електропередачі розвантажуються, і втрати потужності в них зменшуються.

В деяких випадках СК працюють з недозбудженням. Необхідність в цьому виникає, якщо струм в системі містить значну ємнісну складову, яка не компенсується індуктивною складовою струму споживачів. Зазвичай ступінь збудження СК регулюють за допомогою автоматичних пристроїв.

Синхронні компенсатори застосовують також для стабілізації напруги в мережі при передачі енергії по лініях великої протяжності. При великих індуктивних навантаженнях напруга в кінці лінії (у споживачів) виявляється набагато менше, ніж на початку; при малих навантаженнях, навпаки, під впливом ємнісних опорів лінії напруга в кінці лінії може навіть підвищуватися в порівнянні з напругою на

початку. Якщо ж в кінці лінії (у споживачів) включити СК, що працює при великих навантаженнях з перезбудженням і при малих навантаженнях з недозбудженням, то це дозволить підтримувати напругу в кінці лінії практично незмінною.

Умови нагрівання СК при випереджаючому струмі (при перезбудженні) важчі, ніж при тому, що відстає (при недозбудженні), тому за номінальну потужність компенсатора вважають потужність при перезбудженні.

Зазвичай коефіцієнт потужності збільшують до 0,92–0,95, оскільки економія, що отримується від підвищення коефіцієнта потужності до одиниці, не виправдовує витрат, що збільшуються, обумовлених збільшеною потужністю синхронного компенсатора. Так, якщо в даному прикладі потрібно було б збільшити коефіцієнт потужності в мережі до одиниці, то довелося б застосувати синхронний компенсатор потужністю 1050 кВАр, тобто майже в два рази більше, ніж при $\cos \varphi' = 0,95$.

Синхронні компенсатори – це електричні машини великої потужності: від 10 до 160 тис. кВА. Виконують їх зазвичай з горизонтальним розташуванням валу на напругу від 6,6 до 16 кВ, частотою 50 Гц. Число полюсів в СК зазвичай складає $2p=6$ і 8, що відповідає частоті обертання ротора 1000 і 750 об/хв. У сучасних синхронних компенсаторах застосований асинхронний пуск, тому ротор СК забезпечений пусковою кліткою.

Вал компенсатора не передає моменту, що обертає, і тому при його розрахунку враховують лише силу тяжіння ротора і силу магнітного тяжіння. У результаті вал СК в порівнянні з валом синхронного двигуна має зменшений перетин. Це сприяє зменшенню габаритів і полегшенню СК. Оскільки вал СК не має виступаючого кінця, то СК порівняно легко герметизувати з метою застосування в ньому водневого охолодження.

Найбільш важливими характеристиками СК є U-подібні характеристики, що визначають основні параметри компенсатора: значення струмів в обмотці статора і в обмотці збудження. В принципі ці характеристики не відрізняються від U-подібної характеристики синхронного двигуна в режимі х.х. ($P_2=0$). Вказані характеристики будують для різної напруги мережі.

Синхронний компенсатор не несе активного навантаження (його електромагнітна потужність $P_{EM} \approx 0$) і працює при значенні кута $\theta = 0$, що забезпечує СК велику перевантажувальну здатність.

5.9 СИНХРОННІ МІКРОМАШИНИ

Синхронні реактивні двигуни

Характерна особливість синхронних реактивних двигунів (СРД) – відсутність у них збудження з боку ротора. Основний магнітний потік в цьому двигуні створюється виключно за рахунок МРС обмотки статора. В дво- і в трифазних СРД ця МРС є такою, що обертається.

Для з'ясування принципу дії СРД звернемося до виразу електромагнітного моменту явнополюсної синхронної машини, з якого виходить, що якщо відключити обмотку збудження ($E_0 = 0$), то основна складова моменту стає рівною нулю і на ротор машини продовжує діяти лише реактивна складова моменту

$$M_p = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (5.31)$$

Принцип дії СРД полягає в наступному. При включенні обмотки статора в мережу виникає магнітне поле, що обертається.

Як тільки вісь цього поля $d' - d'$ займе положення в просторі розточування статора, при якому вона буде зміщена щодо подовжньої осі незбуджених полюсів ротора $d - d$ на кут θ у бік обертання (рисунок 5.34, а), між полюсами цього поля і виступаючими полюсами незбудженого ротора виникне реактивна сила магнітного тяжіння полюса ротора до полюса поля статора, що обертається F_p .

Вектор цієї сили $\vec{F}_p$ зміщений щодо подовжньої осі ротора також на кут θ , тому сила F_p має дві складові: нормальну F_{np} , направлену по подовжній осі ротора, і тангенціальну F_{tp} , направлену перпендикулярно подовжній осі полюсів ротора.

Сукупність тангенціальних складових реактивних сил F_{tp} на всіх полюсах незбудженого ротора створить реактивний обертальний момент M_p , який обертатиме ротор з синхронною частотою ω_1 . Із

зростанням механічного навантаження на вал СРД кут θ збільшується і момент M_p зростає.

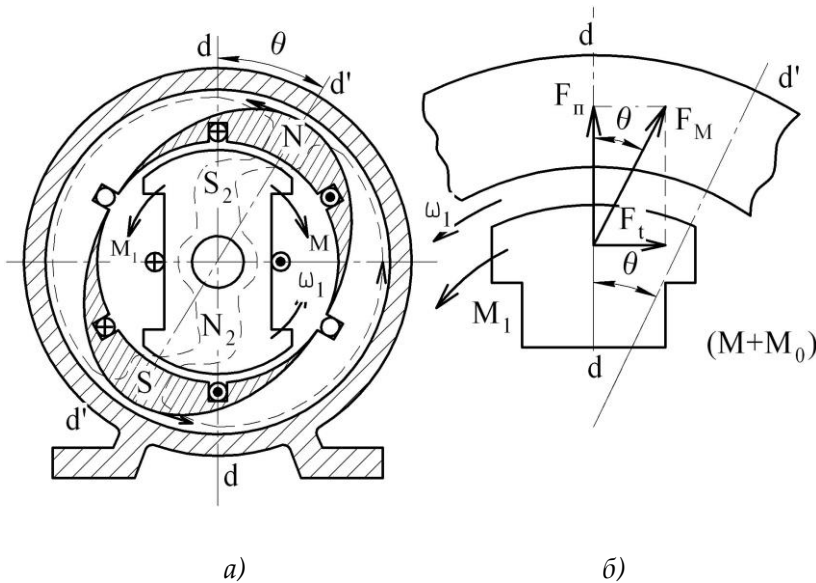


Рис. 5.34 – Принцип дії синхронного реактивного двигуна

Проте 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 із збудженим ротором (рис. 5.29, графік 1), який при $\theta=90^\circ$ має максимальне значення. З рисунка 5.34, б видно, що при $\theta=90^\circ$ реактивні сили магнітного тяжіння $F_{м.р}$, що діють на кожен полюс незбудженого ротора, взаємно врівноважуються і 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 виразом

$$M_p = M_{p\max} \sin 2\theta \quad (5.32)$$

Графічно ця залежність представлена кривою 2 на рисунку 5.29. Неодмінна умова створення реактивного моменту M_p – явнопольсна конструкція ротора, оскільки тільки в цьому випадку $x_q \neq x_d$.

Потужність СРД і момент, що розвивається ним, менші, ніж у синхронного двигуна із збудженими полюсами ротора. Пояснюється це тим, що у СРД через відсутність магнітного потоку ротора $E_0=0$, тому основна складова електромагнітного моменту $M_{осн}=0$ і електромагнітний момент СРД визначається лише реактивною складовою ($M = M_p$). Тому при однакових габаритах синхронного двигуна із збудженими полюсами ротора і СРД потужність на валу і момент, що розвивається, у СРД набагато менші.

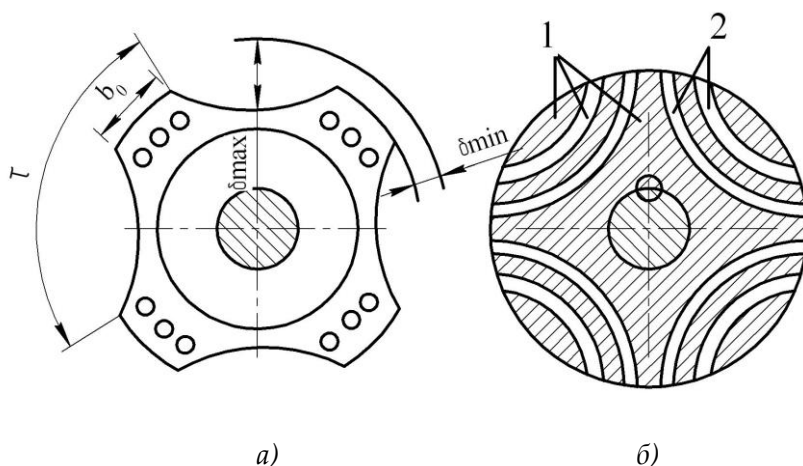


Рис. 5.35 – Конструкція роторів синхронного реактивного двигуна

До недоліків СРД слід також віднести невисокі значення коефіцієнта потужності і ККД. Пояснюється це значним струмом статора, що намагнічує, оскільки збудження СРД відбувається за рахунок магнітного поля статора.

У СРД застосовують асинхронний пуск. Для цього ротор забезпечують короткозамкнутою пусковою кліткою. На рисунку 5.35, 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_p . Проте із збільшенням западин росте середня величина повітряного зазору, що веде до підвищення струму статора, що намагнічує, а отже, до зниження енергетичних показників двигуна – коефіцієнта потужності і

ККД. Крім того, із збільшенням западин скорочуються розміри пускової клітки, що веде до зменшення асинхронного моменту, тобто до зменшення пускового моменту і моменту входу в синхронізм.

Якнайкращі результати дає наступне співвідношення розмірів ротора

$$b_n / \tau = 0,5 \div 0,6 \text{ і } \delta_{\max} / \delta_{\min} = 10 \div 12 \quad (5.33)$$

В цьому випадку вдається добитися відношення $x_d / x_q \approx 2$.

Досконаліша секціонована конструкція ротора СРД, що є циліндром, в якому сталеві смуги 2 залиті алюмінієм 1 (рис. 5.35, б). Така конструкція ротора дозволяє отримати відношення $x_d / x_q \approx 4 \div 5$. За рахунок цього істотно зростає момент $M_{r\max}$ при збереженні струму, що намагнічує, на допустимому рівні.

На торцях секціонованого ротора є відлиті з алюмінію кільця, що замикають алюмінієві прошарки ротора, утворюючи короткозамкнену пускову клітку.

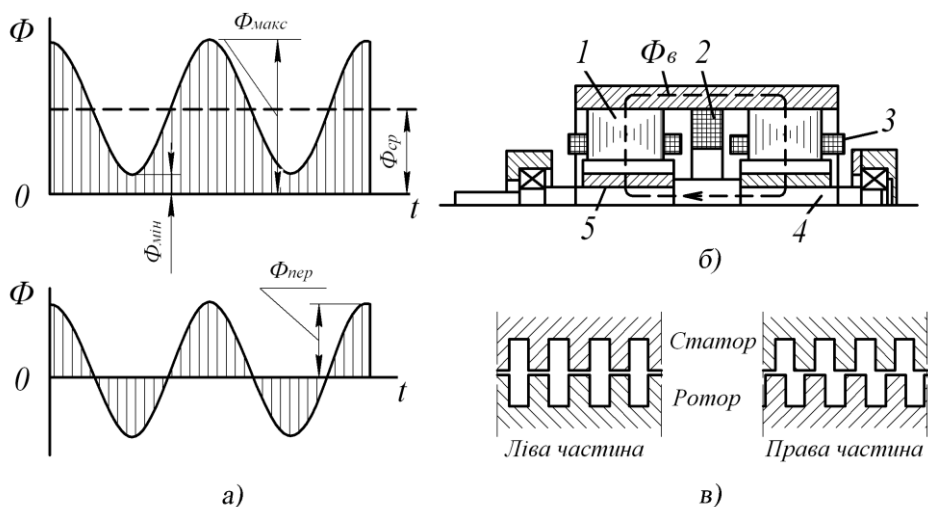
Простота конструкції і висока експлуатаційна надійність забезпечили СРД малої потужності широке застосування в пристроях автоматики для приводу самописних приладів, пристроях звуко- і відеозапису та інших установках, що вимагають строгої постійності частоти обертання.

Індукторні двигуни

Деякі пристрої, наприклад, установки індукційного нагріву, гіроскопічні і радіолокаційні пристрої, вимагають для своєї роботи змінного струму підвищеної частоти, що виражається сотнями і навіть тисячами герц. Отримання таких змінних струмів за допомогою синхронних генераторів звичайної конструкції зв'язане з непереборними труднощами, оскільки пов'язано з необхідністю або збільшення частоти обертання понад 3000 об/хв, або надмірного збільшення числа полюсів, або одночасного застосування обох заходів. Проте збільшення частоти обертання веде до зростання відцентрових зусиль в роторі до небезпечних значень, а збільшення числа полюсів веде до такого зменшення полюсного ділення τ , при якому розміщення обмотки на статорі стає практично неможливим.

Для отримання змінного струму підвищеної частоти (до 30 кГц) застосовують індукторні генератори, характерною ознакою яких є те,

що за один період магнітний потік в них не міняє свого знаку, як в звичайних синхронних генераторах, а лише змінюється від $\Phi_{\max}$ до $\Phi_{\min}$, тобто пульсує (рис. 5.36, а). Пульсуючий потік складається з двох складових: постійної Φ_n і змінної Φ_{zm} , що періодично змінюється як за значенням, так і за напрямом магнітного потоку з амплітудою $\Phi_{zm} = 0,5(\Phi_{\max} - \Phi_{\min})$. Постійна складова потоку не наводить в обмотках ЕРС, а змінна складова, зчіплюючись з робочою обмоткою генератора, наводить в ній ЕРС.



а – графік магнітного потоку; б – конструкція генератора;
в – взаємне розташування зубців статора і ротора

Рис. 5.36 – Індукторний генератор з двоєного типу

Існує декілька конструктивних схем індукторних генераторів. Всі вони засновані на створенні пульсацій магнітного потоку за рахунок зміни провідності магнітного ланцюга, тобто за рахунок зубцевих пульсацій магнітного потоку. Для цього статору і ротору генератора надають зубчасту структуру. Коли зубець ротора знаходиться проти зубця статора, то магнітний потік в зубці статора набуває найбільшого значення, коли ж проти зубця статора розташований паз ротора, то магнітний потік в цьому зубці статора стає найменшим. При цьому частота змін змінного магнітного потоку, а отже, і частота ЕРС,

наведеної в робочій обмотці цим потоком, пропорційні числу зубців ротора Z_2

$$f_1 = Z_2 n_2 / 60. \quad (5.34)$$

Розглянемо одну з конструкцій індукторного генератора – здвоєну (рис. 5.36, б). Статор 1 і ротор 5 генератора виконані здвоєними. Обмотка збудження 2, що розташовується на статорі, підключена до джерела постійного струму і створює магнітний потік, що замикається уздовж валу ротора 4, при цьому на кожній частині статора (і ротора) збуджуються полюси однієї полярності.

Кількість зубців на статорі і на роторі однакова. Пульсації магнітного потоку відбуваються за рахунок зсуву зубців ротора, що обертається, щодо зубців статора. На кожному зубці статора розташована котушка 3, в якій змінний складовий магнітного потоку наводиться ЕРС.

Досить важливим в індукторних генераторах є забезпечення постійності загального магнітного потоку при обертанні ротора, оскільки інакше в обмотці збудження 2 наводиться ЕРС високої частоти. У даному індукторному генераторі постійність загального магнітного потоку обмотки збудження забезпечується тим, що один пакет ротора зміщений щодо іншого пакету на половину зубцевого ділення (рис. 5.36, в). Завдяки цьому магнітний опір сумарному потоку збудження залишається незмінним при будь-якому положенні ротора. Це дозволило ротор генератора зробити сталевим монолітним (а не шихтованим) з пазами, що профрезеровані.

Коефіцієнт корисної дії генераторів індукторного типу дещо нижчий, ніж у генераторів промислової частоти (50 Гц), із-за підвищених електричних втрат в обмотці статора, обумовлених ефектом витіснення струму, що викликає збільшення активного опору обмотки. Відсутність обмоток на роторі дозволяє виключити в індукторному генераторі контактні кільця. Це спрощує конструкцію генератора і підвищує його надійність.

Генератори індукторного типу застосовуються як збудники турбогенераторів серії ТВВ. На рисунку 5.37 показана конструкція такого збудника – генератора індукторного типу потужністю 2700 кВА. На відміну від індукторного генератора здвоєного типу ротор збудника має шихтовану конструкцію. Вентиляція генератора виконана по замкнутому циклу із застосуванням газоохолоджувачів.

Індукторна синхронна машина зворотна, тобто вона може працювати не тільки в генераторному, але і в руховому режимі. Індукторні синхронні двигуни дозволяють отримувати 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 в осерді ротора: $n_1 = f_1$

Для отримання магнітного поля, що обертається, обмотку статора індукторного двигуна роблять або трифазною, або однофазною. У останньому випадку на статорі окрім робочої розташовують ще і пускову обмотку, що включається в мережу через пусковий конденсатор.

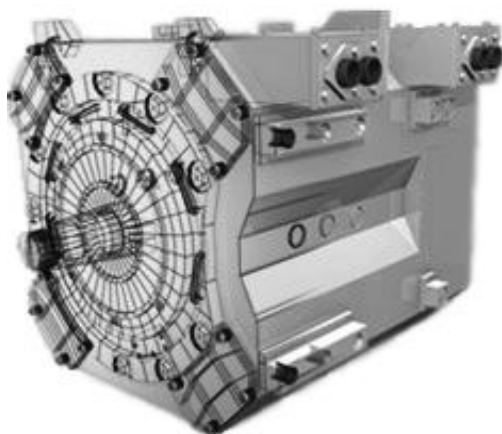


Рис. 5.37 – Збуджувач індукторного типу

Гістерезисні двигуни

Робота гістерезисного двигуна заснована на дії гістерезисного моменту. На рисунку 5.38, *a* показано два полюси постійного магніту (поле статора); між ними розташований циліндр (ротор) з магнітно-твердого матеріалу. Під дією зовнішнього магнітного поля ротор намагнічується. На стороні, зверненій до північного полюса постійного магніту, збуджується південний полюс, а на стороні ротора, зверненій 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 унаслідок явища магнітного запізнювання (гістерезису) активна

частина ротора не перемагнічуватиметься одночасно із зміною напрямку магнітного поля, що обертається, і між віссю поля ротора і віссю зовнішнього поля з'явиться кут γ .

Сили F_m , що діють на ротор, також змінять свій напрям на кут γ , а тангенціальні складові цих сил F_t створюють гістерезисний момент M_H (рис. 5.38, б).

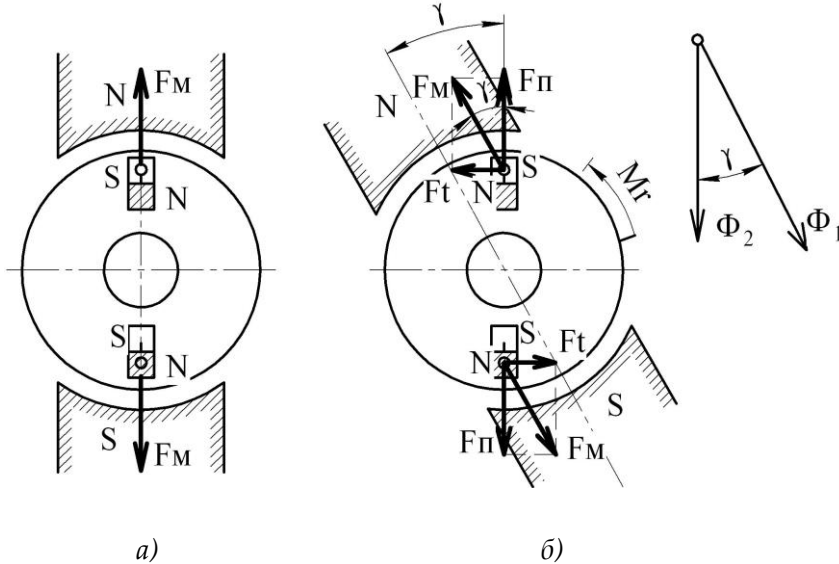


Рис. 5.38 – До поняття про гістерезисний момент

Явище магнітного запізнювання полягає в тому, що частинки феромагнітного матеріалу (поміщеного в зовнішнє магнітне поле), що є елементарними магнітами, прагнуть орієнтуватися відповідно до напрямку зовнішнього поля. Якщо зовнішнє поле змінить свій напрям, то елементарні частинки міняють свою орієнтацію. Проте повороту елементарних частинок перешкоджають в магнітно-твердих матеріалах внутрішні сили молекулярного тертя. Для зміни напрямку цих частинок необхідна певна МРС, унаслідок чого перемагнічування ротора дещо відстає від зміни напрямку зовнішнього поля. Це відставання (магнітне запізнювання) характеризується кутом гістерезисного зрушення γ між вектором магнітного потоку ротора Φ_2 і вектором магнітного потоку обмотки статора Φ_1 . Цей кут залежить виключно від магнітних властивостей матеріалу ротора.

На подолання сил молекулярного тертя витрачається частина потужності, що підводиться, яка складає втрати на гістерезис. Величина цих втрат залежить від частоти перемagnetичування ротора $f_2 = f_1 s$, а отже, від ковзання

$$P_2 = s P_{2,к}, \quad (5.35)$$

де $P_{2,к}$ – втрати на гістерезис при нерухомому роторі (при $s=1$), тобто в режимі к.з.

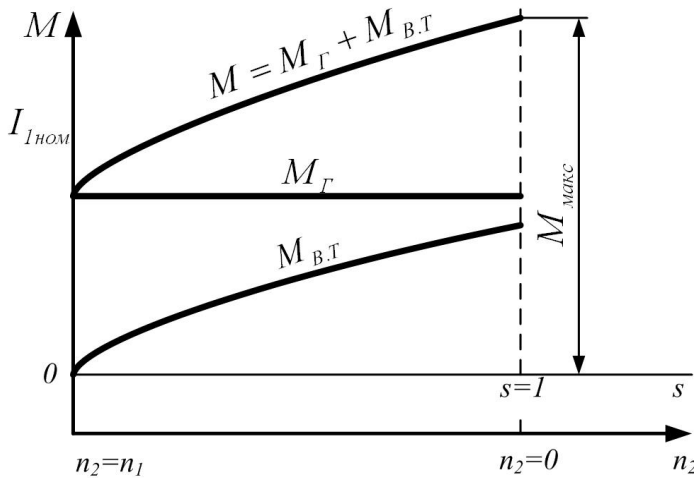


Рис. 5.39 – Механічні характеристики гістерезисного двигуна

Оскільки електромагнітна потужність, передана ротору, дорівнює втратам в роторі, що діляться на ковзання

$$P_{ем} = P_2 / s = P_{2,к}, \quad (5.36)$$

а момент, що обертає, – електромагнітній потужності, що ділиться на синхронну кутову швидкість

$$M_2 = P_{ем} / \omega_1 = P_{2,к} / \omega_1, \quad (5.37)$$

то, очевидно, величина гістерезисного моменту не залежить від частоти обертання ротора (ковзання). Графік $M = f(s)$ є прямою, паралельною осі абсцис (рис. 5.38).

Кут гістерезисного зрушення залежить від ширини петлі гістерезису: чим ширше петля гістерезису магнітного матеріалу, тим

більше кут гістерезисного зрушення. На рисунку 5.40, а представлені дві петлі гістерезису: звичайної сталі (крива 2) і сплаву вікалою (крива 1).

Застосування звичайної сталі для виготовлення ротора не забезпечує гістерезисного моменту достатньої величини. Тільки магнітно-тверді матеріали, наприклад такі, як вікалою, дають можливість отримати великий гістерезисний момент. Ротори гістерезисних двигунів зазвичай роблять збірними. Магнітно-тверда частина виконується у вигляді шихтованого або масивного кільця 1, розміщеного на втулці 2 (рис. 5.40, б). Остання жорстко посаджена на вал 3.

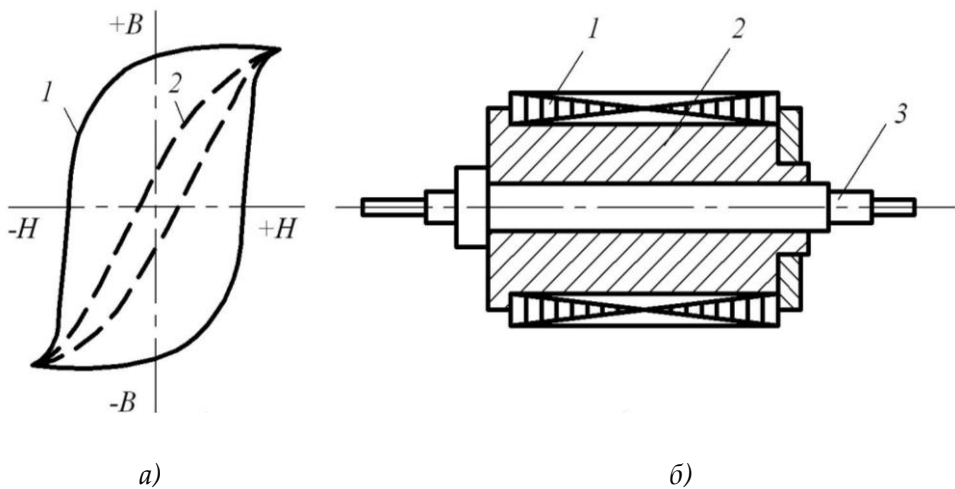


Рис. 5.40 – Петлі гістерезису звичайної електротехнічної сталі і вікалою а) і пристрій збірного ротора гістерезисного двигуна б)

У машинах з нешихтованим (масивним) ротором поле статора, що обертається, наводить в роторі вихрові струми. У результаті взаємодії цих струмів з полем статора виникає електромагнітний момент $M_{Б.Т.}$, значення якого пропорційно ковзанню

$$M_{Б.Т.} = sP_{Б.Т.К} / \omega_1, \quad (5.38)$$

де $P_{Б.Т.К}$ – втрати на вихрові струми в роторі при $s = 1$, тобто в режимі к.з., Вт;

ω_1 – кутова синхронна швидкість, рад/с.

Найбільшого значення момент $M_{B.T}$ досягає при нерухомому роторі ($s=1$), тобто у момент пуску електродвигуна. Потім у міру зростання частоти обертання (зменшенні ковзання) момент $M_{B.T}$ зменшується (рис. 5.39), при синхронній частоті він стає рівним нулю.

Таким чином, електромагнітний момент гістерезисного двигуна, що обертає, створюється сумісною дією моментів від вихрових струмів $M_{B.T}$ і гістерезисного M_{Γ}

$$M_m = sP_{B.T.K} / \omega_1 + P_{\Gamma.K} / \omega_1 \quad (5.39)$$

На рисунку 5.39 представлена залежність результуючого моменту гістерезисного двигуна від ковзання: $M = f(s)$. Характер цієї кривої залежить від співвідношення моментів $M_{B.T}$ і M_{Γ} .

Гістерезисний двигун може працювати з синхронною і асинхронною частотами обертання. Проте робота двигуна в асинхронному режимі неекономічна, оскільки пов'язана із значними втратами на перемагнічування ротора, величина яких зростає із збільшенням ковзання.

Переваги гістерезисних двигунів – простота конструкції, безшумність і надійність в роботі, великий пусковий момент, плавність входу в синхронізм, порівняно високий ККД, мала зміна кратності струму від пуску до номінального навантаження ($I_n / I_{ном} = 1,3 - 1,4$).

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 розгойдувань, що створює нерівномірність ходу (обертання). Пояснюється це відсутністю у гістерезисних двигунів пускової клітки, яка при різких змінах навантаження чинить на ротор заспокійливу (демпфуючу) дію. Найбільш сильне розгойдування спостерігається у шихтованого ротора, в якому вихрові струми сильно обмежені. Нерівномірність обертання, що викликається розгойдуваннями, обмежує сфери застосування гістерезисних двигунів.

? КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть роль синхронних машин у виробництві електроенергії. Чому машина називається синхронною?
2. Поясніть різницю в конструкції роторів потужних синхронних генераторів.
3. Поясніть конструктивні відмінності турбогенераторів, гідрогенераторів та дизель-генераторів.
4. Які існують способи збудження синхронних машин? Які вимоги ставляться до систем збудження синхронних генераторів?
5. Поясніть конструкцію та призначення збуджувача та підзбуджувача синхронної машини.
6. Що слід розуміти під реакцією якоря синхронного генератора?
7. Поясніть, як діє реакція якоря в синхронному генераторі при активному, індуктивному, ємнісному та змішаному характерах навантаження.
8. Що є основною причиною зміни напруги навантаженого синхронного генератора?
9. Які існують характеристики для синхронних генераторів, що характеризують їх властивості?
10. Які втрати синхронних машин відносять до основних, а які до додаткових втрат? Як визначаються електричні втрати в обмотці статора синхронної машини?
11. Що слід розуміти під синхронізацією синхронного генератора з мережею? Які є способи синхронізації генератора з мережею, в чому їх переваги та недоліки?
12. Як регулюється активне навантаження синхронного генератора при паралельній роботі з мережею?
13. Поясніть природу виникнення основного та додаткового (реактивного) електромагнітних моментів явнopolюсної синхронної машини.
14. Поясніть природу виникнення синхронізуючої потужності (моменту) синхронної машини при паралельній роботі з мережею.
15. Поясніть процеси, що відбуваються в синхронному генераторі, який працює паралельно з мережею при зміні струму збудження.
16. Чим пояснити поширене використання в сучасних електроприводах синхронних двигунів?

17. Наведіть конструктивну схему синхронного двигуна і поясніть принцип дії синхронного двигуна.

18. Які переваги та недоліки синхронного двигуна у порівнянні з асинхронним?

19. На яку потужність і де використовуються синхронні двигуни загального призначення?

20. Що таке синхронний компенсатор? Що дає використання синхронних компенсаторів в електричних системах?

21. Поясніть принцип дії та конструкцію синхронного реактивного двигуна.

22. Як запускаються і де використовуються реактивні синхронні двигуни?

ГЛОСАРІЙ

Асинхронна машина (*Asynchronous machine*) – машина змінного струму, у якій відношення швидкості обертання і частоти мережі, до якої машина підключена, не є постійною величиною.

Вихрові струми – електричні струми в провідному тілі, викликані електромагнітною індукцією, які замикаються по контурах, що утворюють одну область.

Генератор – машина, що перетворює механічну енергію в електричну.

Двигун – машина, що перетворює електричну енергію в механічну.

Електричний апарат – електротехнічний пристрій для управління потоками енергії та інформації, режимами роботи, контролю і захисту технічних систем та їх компонентів.

Електрична машина (*Electric machine*) – електричний перетворювач, який перетворює електричну енергію в механічну і навпаки.

Електрорушійна сила – скалярна величина, що характеризує здатність стороннього поля та індукованого електричного поля викликати появу електричного струму.

Електротехнічний пристрій – пристрій, призначений для виробництва, перетворення, розподілу, передачі і використання електричної енергії або для обмеження можливості її передачі.

Індуктор електричної машини – частина електричної машини, на якій розташовуються постійні магніти або обмотка збудження.

Коефіцієнт корисної дії – відношення потужності, що віддається, до потужності, що підводиться.

Коефіцієнт потужності – відношення активної потужності до повної.

Колектор обертової електричної машини – комплект ізолюваних одна від іншої струмопровідних пластин з розташованими на них щітками, що забезпечує протікання струму в обертовій електричній машині з однієї частини кола в іншу за допомогою ковзного контакту.

Комутація колекторної машини – перемикання секцій обмотки колекторної машини з однієї паралельної гілки в іншу.

Магнітна індукція – векторна величина, що характеризує магнітне поле і визначає силу, яка діє на рухому заряджену частинку з боку магнітного поля.

Магнітне поле розсіювання обмоток – частина магнітного поля трансформатора, яка утворена тією частиною магніторушійних сил всіх його основних обмоток, геометрична сума векторів яких в кожній фазі обмоток дорівнює нулю.

Магнітна система – частина електротехнічного виробу, що є сукупністю феромагнітних деталей та призначена для проведення в ній основного магнітного потоку.

Магнітне поле трансформатора – магнітне поле, яке створено в трансформаторі сукупністю магніторушійних сил всіх його обмоток і інших частин, в яких протікає електричний струм.

Магніторушійна сила – скалярна величина, що дорівнює лінійному інтегралу напруженості магнітного поля вздовж контура і повному струму, який охоплює цей контур.

Напруженість магнітного поля – векторна величина, що характеризує електричне поле і визначає силу, що діє на заряджену частинку з боку електричного поля.

Обмотка електротехнічного пристрою – сукупність розташованих визначеним чином і з'єднаних проводів, призначена для створення чи використання магнітного поля або для отримання заданого значення опору виробу.

Основне магнітне поле трансформатора – частина магнітного поля трансформатора, яка утворена різницею суми магніторушійних сил всіх його обмоток і суми магніторушійних сил обмоток, які утворюють поле розсіювання і поле нульової послідовності обмоток трансформатора.

Поліус обертової електричної машини – частина осердя обертової електричної машини, на якій розташована обмотка збудження, або частина магнітопроводу, що виступає в напрямку повітряного проміжка.

Потокозчеплення – сума магнітних потоків, зчеплених з провідниками елемента електричного кола.

Режим роботи – установлений порядок чергування і тривалості навантаження, холостого ходу, гальмування, короткого замикання, пуска і реверса електричної машини під час її роботи.

Ротор – обертова частина електричної машини.

Сельсин – інформаційна електрична машина змінного струму, яка призначена для виробництва напруги, амплітуда і фаза яких визначається кутовим положенням ротора і застосовується у якості датчика (перетворювача) або приймача в системах дистанційної синхронної передачі кутових переміщень.

Синхронна машина – безколекторна машина змінного струму, у якій в усталеному режимі відношення частоти обертання ротора до частоти струму в колі, який підключений до обмотки якоря, не залежить від навантаження в області допустимих навантажень.

Статор – частина електричної машини, яка включає в себе нерухомий магнітопровід з обмоткою.

Схема заміщення електричного кола – схема електричного кола, що відображає якості кола при визначених умовах.

Трансформатор – статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуковано зв'язаних обмоток і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінного струму в одну або декілька інших систем змінного струму.

Якір колекторної машини постійного струму – частина колекторної машини постійного струму, в якій індукується ЕРС і протікає струм навантаження.

Якір синхронної машини – частина синхронної машини, в якій індукується ЕРС і протікає струм навантаження.

Ярмо – частина магнітної системи електричної машини, що не несе основних обмоток і не слугує для замикання магнітного кола.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс – 3-е изд. перераб. и доп. /А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 718 с.
2. Цифрові аналізатори параметрів мережі. Компоненти та системи автоматизації: каталог продукції. – Львів: ПП “Електросвіт”, 2011. – 100 с. Режим доступу http://es.ua/files/poligrafia/catalog_2011.pdf.
3. Электродвигатели асинхронные: каталог продукции. – Киев: ЭлектроМотор “Магнум”, 2011. – 2 с. Режим доступу: www.electromotor.com.ua.
4. Брускин Д.Э. Электрические машины: В 2-х ч. ч. 1: учеб. для электротехн. спец. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / Д. Э. Брускин, А.Е. Захарович, В.С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1987. – 319 с.: ил.
5. Кацман М. М. Электрические машины: учебник для сред. спец. учеб. заведений. – М.: Высш. школа, 1983. – 432 с., ил.
6. Производственная компания УралЭнергоснаб: каталог. Официальный представитель Минского электротехнического завода имени В.И. Козлова. Режим доступу: www.ues-rb.ru/materiali_dlya_izgotovleniya.html.
7. Franklin electric – электродвигатели для скважин. Группа компаний “Рица”: каталог. Режим доступу: <http://hacoc.ru/cat/?id=866>.
8. Трансформаторы сухие с литой изоляцией: каталог сухих трансформаторов с литой изоляцией. – Киев: ИталТехно, 2011. – 10 с. Режим доступу: www.ital-tecno.com.ua.
9. Трансформаторы сухие с литой изоляцией: каталог продукции. – Киев: Enersys, 2011. – 2 с. Режим доступу: www.enersys.in.ua.
10. Трансформаторы сухие и токоограничивающие реакторы: каталог сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов. – Екатеринбург: Группа СвердловскЭлектро, 2011. – 27 с. Режим доступу: www.svel.ru.
11. Электродвигатели асинхронные: каталог электродвигателей асинхронных и других электротехнических изделий. – Харьков: Харьковский электротехнический завод “Укрэлектромаш”, 2010. – 41 с. Режим доступу: www.td-helz.com.ua.
12. Двигатели асинхронные взрывозащищенные серии АИММ, АИУ: каталог продукции. – Новая Каховка: ООО “Новокаховский

электромашиностроительный завод”, 2011. – 4 с. Режим доступа: e-mail: sales.nkemz@nk.rosenergomash.com.

13. Двигатели асинхронные: каталог продукции. – Могилев: ОАО “Могилевский завод «Электродвигатель”, 2011. – 33 с. Режим доступа: www.mez.by.

14. Трансформаторы силовые: каталог продукции. – Запорожье: ОАО “Завод малогабаритных трансформаторов”, 2011. – 41 с. Режим доступа: www.mgt.com.ua.

15. Трансформаторы масляные: каталог масляных трансформаторов. – Екатеринбург: Группа СвердловскЭлектро, 2011. – 15 с. Режим доступа: www.svel.ru.

16. Трансформаторы тока: каталог продукции. – Ужгород: ООО “Симо и Ганц”, 2011. – 100 с. Режим доступа: www.symo@symoganz.com.

17. Измерительные трансформаторы тока и напряжения: каталог. – К.: Вектор – ВС, 2011. – 55 с. Режим доступа: www.vector-vs.kiev.ua.

18. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х т. Т.1. Изд. 2-е перераб./ Под ред. Ю.В. Корицкого. – Л.: Энергия, 1974. – 584 с.

19. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х т. Т.2. Изд. 2-е перераб./ Под ред. Ю.В. Корицкого. – Л.: Энергия, 1974. – 616 с.

20. Справочник по электротехническим материалам. – В 3-х т. Т.3. Изд. 2-е перераб. / Под ред. Ю.В. Корицкого. – Л.: Энергия, 1976. – 896 с.

21. Парселл Э. Электричество и магнетизм: учебное руководство: пер. с англ. /Под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга. – 3-е изд., испр. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – (Берклевский курс физики). – 416 с.

22. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. – Т.1. / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.

23. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. – Т.2. / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

24. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие для вузов. – В 5 кн. – Кн. 2. Электричество и магнетизм – 4-е изд., перераб. / И.В. Савельев. – М.: Наука, Физматлит, 1998. – 372 с.

25. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: підручник у 3-х томах / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін. [За заг. ред.

І.М. Чиженка, В.С. Бойка] – К.: Видавництво “Політехніка”, 2004. – 272 с.: іл.

26. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

27. Брускин Д.Э. Электрические машины: В 2-х ч. Ч. 2.: учеб. для электротехн. спец. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / Д.Э. Брускин, А.Е. Захарович, В.С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.

28. Хвостов В.С. Электрические машины. Машины постоянного тока / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. – 336 с.

29. Брускин Д.Э. Электрические машины и микромашины. / Д.Э. Брускин, А.Е. Захарович, В.С. Хвостов. – М.: Высш. шк., 1990. – 528 с.

30. Андрианов В.Н. Электрические машины и аппараты. / В.Н. Андрианов – М.: Колос, 1971. – 448 с.

31. Справочник по электрическим машинам / Под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокотова. – Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

32. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. / И.П. Копылов – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.: ил.

33. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. / М.М. Кацман. – М.: Издательский центр “Академия”, 2005. – 480 с.

34. Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини): лабораторний практикум з дисципліни “Енергетичні засоби в АПК” (Електричні машини) для студентів спеціальності 6.091901 – “Енергетика сільськогосподарського виробництва” / Укл.: М.О. Чуєнко, Р.М. Чуєнко, А.Г. Кушніренко. – Ніжин, 2009. – 276 с.

35. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К. Знання, 2009. – 399 с.

36. Лотоцкий К.В. Електричні машини і основи електроприводу / К.В. Лотоцкий. – К.: Вища школа, 1979. – 475 с.

37. Лотоцкий К.В. Электрические машины и основы электропривода / К.В. Лотоцкий. – М.: Колос, 1964. – 495 с.

38. Кацман М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – М.: Высш. шк., 1990. – 463 с.

39. Притужалов В.Я. Электрические машины / В.Я. Притужалов – Мариуполь.: [б. и.], 2000. – 300 с.

-
-
40. Китаев В.Е. Электрические машины / В.Е. Китаев, Ю.М. Корхов, В.К. Свирин. – М.: Высшая школа, 1978. – 184 с.
41. Куценко Ю.М. Монтаж електрообладнання і систем керування: підручник для студентів аграрних ВНЗ / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев / За ред. проф. Яковлева В.Ф. – К.: Аграрна освіта, 2009. – 348 с.
42. Правила улаштування електроустановок. – 2-ге вид., переробл., і допов. – Харків : Форт, 2009. – 736 с.
43. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: ВП “ГРАНМНА”, 2001. – 117 с.
44. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К.: АТ “Київська книжкова фабрика”, 1988. – 380 с.
45. Кислицын А.Л. Синхронные машины: учебное пособие по курсу “Электротехника” / А.Л. Кислицын. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 108с.
46. Електрощитове обладнання: каталог продукції. – К.: ТОВ “ВАП-БУД”, 2011. – 24 с. Режим доступу: <http://vapbud.com.ua>.
47. Каталог электротехнической продукции. – Кривой Рог: ООО «Промфактор», 2011. – 118 с. Режим доступу: “<http://www.promfactor.com/download/catalog/pf2.pdf>”
48. Двигуни електричні. Каталог. – Нова Каховка: ВАТ “ПІВДЕНЬ-ЕЛЕКТРОБУД”, 2007. – 22 с. Режим доступу: www.td_uemz@ukr.net

Додаток А
(довідковий)

КЛАСИФІКАЦІЯ КАТЕГОРІЙ ЗАСТОСУВАННЯ
КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

Таблиця А.1 – Категорії для змінного струму

АС 1	комутація електропечей опору, неіндуктивне або малоіндуктивне навантаження
АС 2	пуск та гальмування противключенням електродвигунів з фазним ротором
АС 3	прямий пуск електродвигунів з короткозамкненим ротором, відключення двигунів, що обертаються
АС 4	пуск та гальмування противключенням електродвигунів з короткозамкненим ротором
АС 11	керування електромагнітом змінного струму
АС 20	комутація електричних кіл без струму або з незначним струмом
АС 21	комутація активних навантажень, включаючи помірні перевантаження
АС 22	комутація змішаних активних та індуктивних навантажень, включаючи помірні навантаження
АС 23	комутація навантажень двигунів або інших високоіндуктивних навантажень

Таблиця А.2 – Категорії для змінного і постійного струмів

А	відключення електричних кіл в умовах короткого замикання при відсутності спеціальної вибіркової (селективності) за часом відносно послідовно з'єднаних на стороні навантаження апаратів
В	відключення електричних кіл в умовах короткого замикання при наявності спеціальної вибіркової (селективності) за часом відносно послідовно з'єднаних апаратів на стороні навантаження

Таблиця А.3 – Категорії для постійного струму

DC 1	комутація електропечей опору, неіндуктивне або малоіндуктивне навантаження
DC 2	пуск електродвигунів з паралельним збудженням та відключення електродвигунів, що обертаються, з паралельним збудженням
DC 3	пуск електродвигунів з паралельним збудженням та відключення нерухомих або що повільно обертаються електродвигунів, гальмування противключенням
DC 4	пуск електродвигунів з послідовним збудженням та відключення електродвигунів, що обертаються, з послідовним збудженням
DC 5	пуск електродвигунів з послідовним збудженням, відключення нерухомих або що повільно обертаються електродвигунів, гальмування противключенням
DC 11	керування електромагнітом постійного струму
DC 20	включення та відключення кола без перевантаження або з незначним струмом
DC 21	комутація активних навантажень, включаючи помірні навантаження
DC 22	комутація змішаних активних та індуктивних навантажень, включаючи помірні навантаження
DC 23	комутація високоіндуктивних навантажень

Додаток Б

АВТОМАТИЧНІ ВИМИКАЧІ СЕРІЇ “АСКО”

Таблиця Б1 – Технічні характеристики автоматичних вимикачів серії “Аско”

Тип		ВА-2004/30	ВА-2004/50	ВА-2004/60	ВА-2004/100
Макс. напруга, В		660			
Часострумova характеристика		C			
Кількість полюсів		2, 3	2, 3	2, 3	2, 3, 4
Номинальний струм		3, 5, 10, 15, 20, 30	10, 20, 30, 40, 50	10, 20, 30, 40, 50, 60	60, 75, 100
Комутаційна здатність	АС380В	18	18	18	35
	АС242В	24	24	24	45

Таблиця Б2 – Технічні характеристики автоматичних вимикачів серії “Аско”

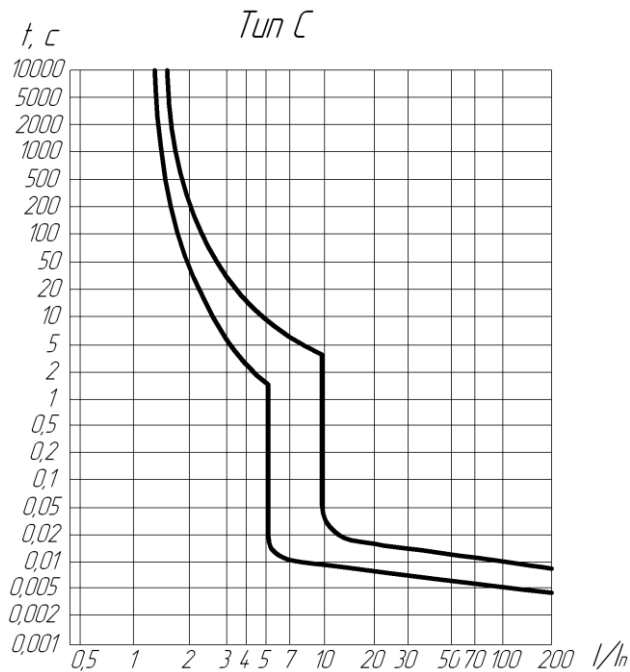
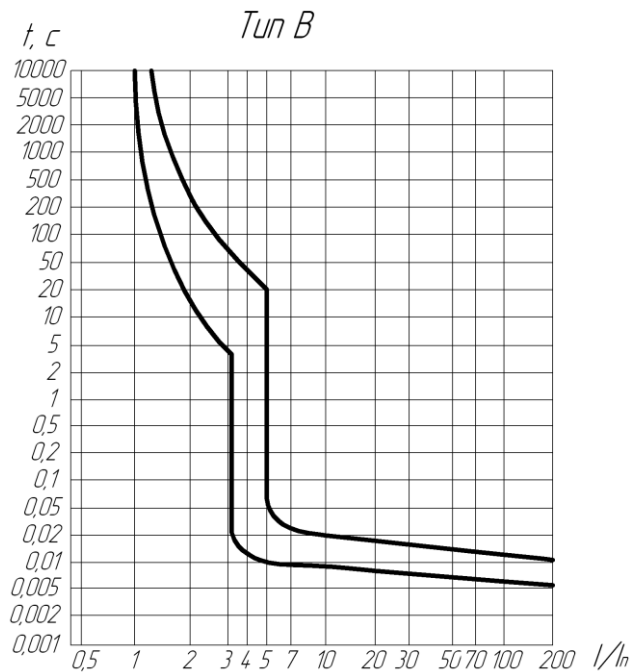
Тип		ВА-2004/250	ВА-2004/400	ВА-2004/630	ВА-2004/800
Макс. напруга, В		660			
Часострумova характеристика		C			
Кількість полюсів		2, 3, 4	2, 3, 4	3, 4	3, 4
Номинальний струм		125, 150, 175, 200, 225, 250	250, 300, 350, 400	500, 600, 630	600, 700, 800
Комутаційна здатність	АС380В	35	35	50	50
	АС242В	45	80	80	80

**Таблиця Б3 – Технічні характеристики автоматичних
вимикачів серії “Аско”**

Тип	ВА-2000	ВА-2001	ВА-2006	ВА-2002	ВА-2003
Кількість полюсів	1, 2, 3			1+N, 3+N	3
Часострумова характеристика	B	C	D	C	D
Ном. струм комутації, А	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63				50, 63, 80, 100
Ном. напруга комутації, В	220/380				
Гранична комут. здатність, А	6000				
Ступінь захисту	IP20				

**Таблиця Б4 – Позначення автоматичних вимикачів серії
“АСКО”**

ВА 2004/30 3/30А					ВА 20 01 1/32А				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1. Вимикач автоматичний					1. Вимикач автоматичний				
2. Типорозмір корпусу					2. Типорозмір корпусу				
3. Модифікація виробу					3. Модифікація виробу				
4. Кількість полюсів					4. Кількість полюсів				
5. Номінальний струм					5. Номінальний струм				



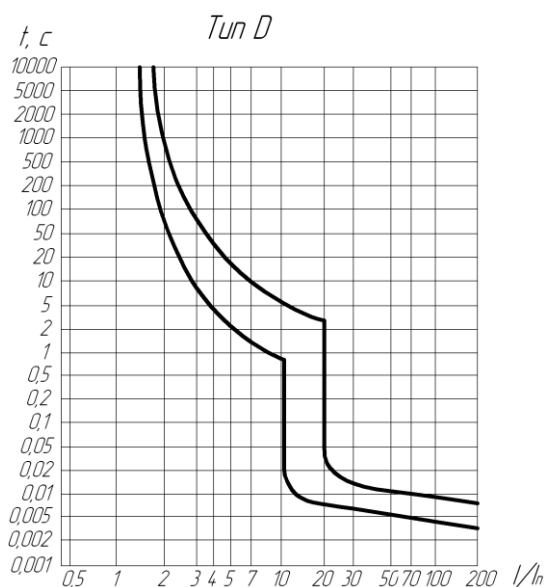


Рис. Б1 – Часострумові характеристики автоматичних вимикачів серії “АСКО”

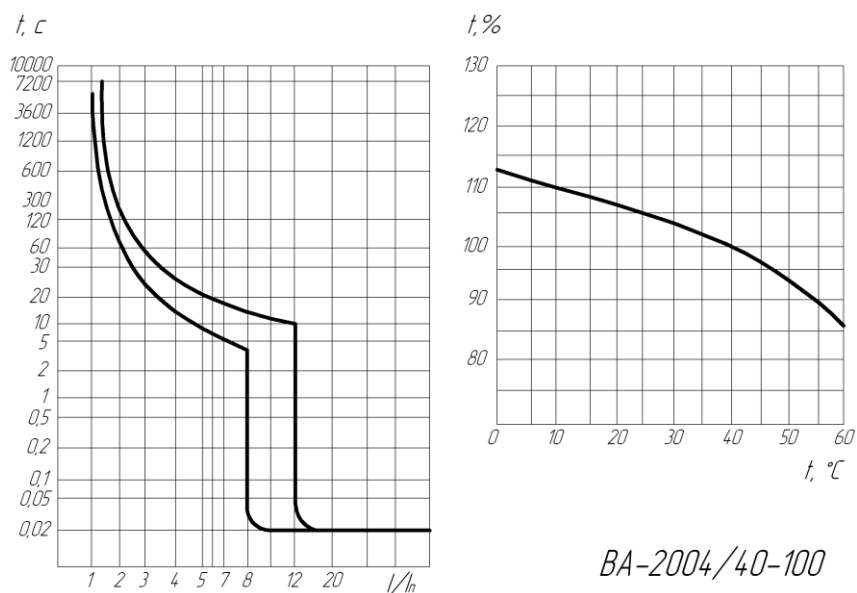


Рис. Б2 – Часострумові характеристики автоматичних вимикачів серії “АСКО”

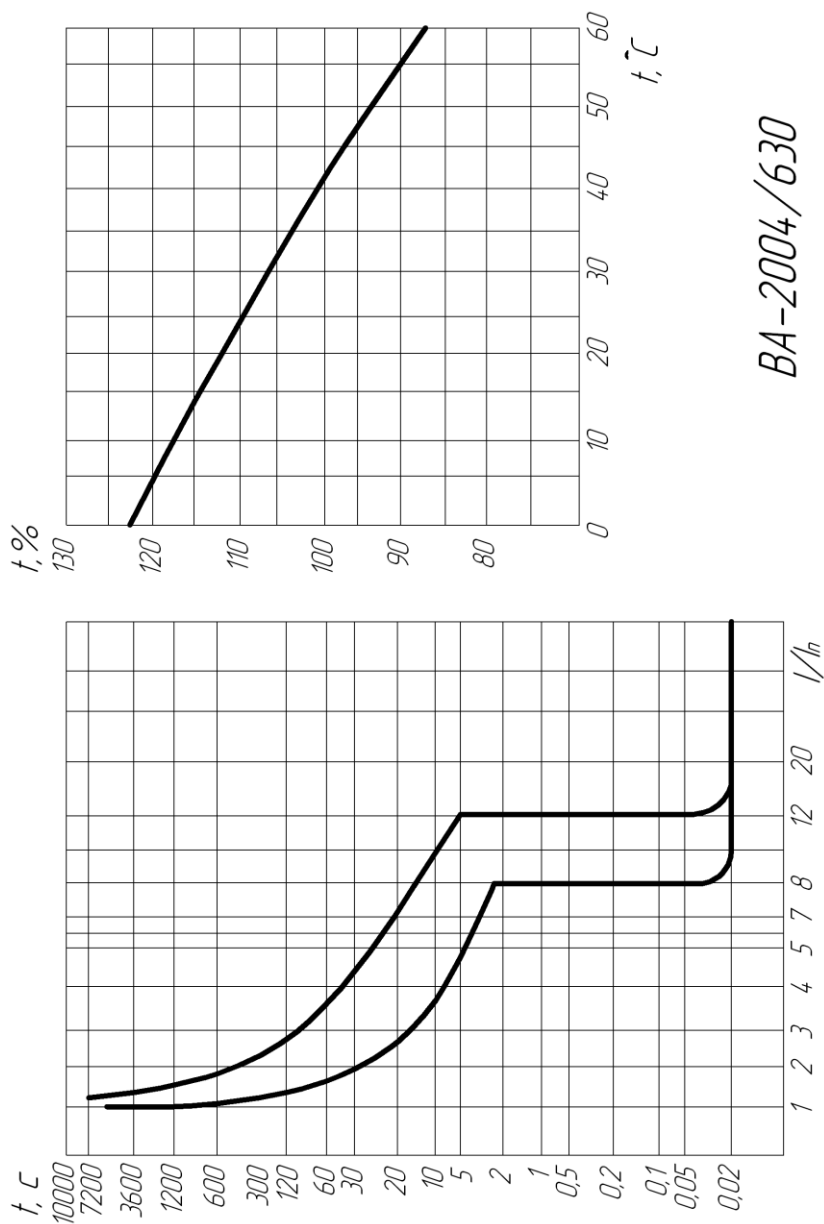


Рис. БЗ – Часострумові характеристики автоматичних вимикачів серії “АСКО”

Таблиця Б5 – Магнітні пускачі серії “АСКО”

Силова частина

Тип пускача		ПМ 1-09	ПМ 1-12	ПМ 1-18	ПМ 2-25	ПМ2-32	ПМ 3-40	ПМ 3-50	ПМ 4-65	ПМ 4-80	ПМ 4-95
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ном. напруга, В		220									
Пробійна напруга, кВ		6									
Ном. струм, А	АС3	9	12	18	25	32	40	50	65	80	95
	АС4	3,5	5	7,7	8,5	12	18,5	24	28	37	44
Потуж. 3-х фазних АД, кВт	230В	2,2	3	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	25
	400В	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37	45
Тепловий струм, А		20	20	32	40	50	60	80	80	125	125
Електрична зносостійкість	АС4х10^4	20	15÷20	7÷20	7÷15	7÷15	7÷10	7	6÷7	5÷7	5÷7
	АС3х10^5	2									1,6
Контакти	10	3P+NO					3P+NO+NC				
	01	3p+NC									
Інагр. Мах (t<1сек), А		162	216	324	450	576	720	90	1170	1440	1710
Гранич. комут. здатність, А		3000		5000			3000		5000		
Рекомендуемий захист від надструмів, А		10	20	25	40	50	50	63	80	100	100
Потужність розсіювання, Вт	АС1	0,2	0,36	0,8	1,25	2,0	2,4	3,7	4,2	5,1	7,2
	АС3	1,56	1,56	2,5	3,2	5,0	5,4	6,4	9,6	12,5	12,5

Таблиця Б6 – Запобіжники серії “АСКО”

Тип	Ном. струм, А	Ном. напруга, В
NT00	4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100	500
NT0	6, 10, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	
NT1	80, 100, 125, 160, 200, 224, 250	
NT2	125, 160, 200, 224, 250, 300, 315, 355, 400	
NT3	315, 355, 400, 425, 500, 630	

Додаток В
(довідковий)
Електроприводи уніфіковані трифазні постійного струму ЭТУ-2

Електроприводи подачі призначені для реверсивних швидкодіючих широкорегульованих приводів з однозонним регулюванням швидкості, в тому числі для механізмів подач станків з ЧПК, промислових маніпуляторів та інших механізмів.

Електроприводи головного руху призначені для реверсивних та реверсивних широкорегульованих приводів потужністю до 220 кВт з двозонним й однозонним регулюванням швидкості, в тому числі для механізмів головного руху станків з ЧПК та інших механізмів.

Основні технічні дані та характеристики

Напруга живлячої мережі, В

при частоті 59 Гц 220, 380, 400, 415

при частоті 60 Гц 220, 230, 380, 400, 415, 440

Номінальний струм перетворювача:

для живлення якірного кола двигуна, А 25, 40, 50, 100, 200, 400, 630

для живлення обмотки збудження двигуна, А 5, 10, 20

Номінальна випрямлена напруга перетворювача для приводів, В

подач 115, 230

головного руху 230, 460

Діапазон регулювання для приводів:

подач (П) 1:10000

головного руху реверсивних двозонних (Д) 1:1000 в першій зоні

5:1 в другій зоні

головного руху нереверсивних й однозонних

реверсивних зі зворотним зв'язком за швидкістю (М) 1:1000

головного руху нереверсивних та однозонних

реверсивних зі зворотним зв'язком за ЕРС (Е) 1:20

реверсивних зі зворотним зв'язком за ЕРС (Е) 1:20

Ступінь захисту за ГОСТ 14254:

блоків IP00

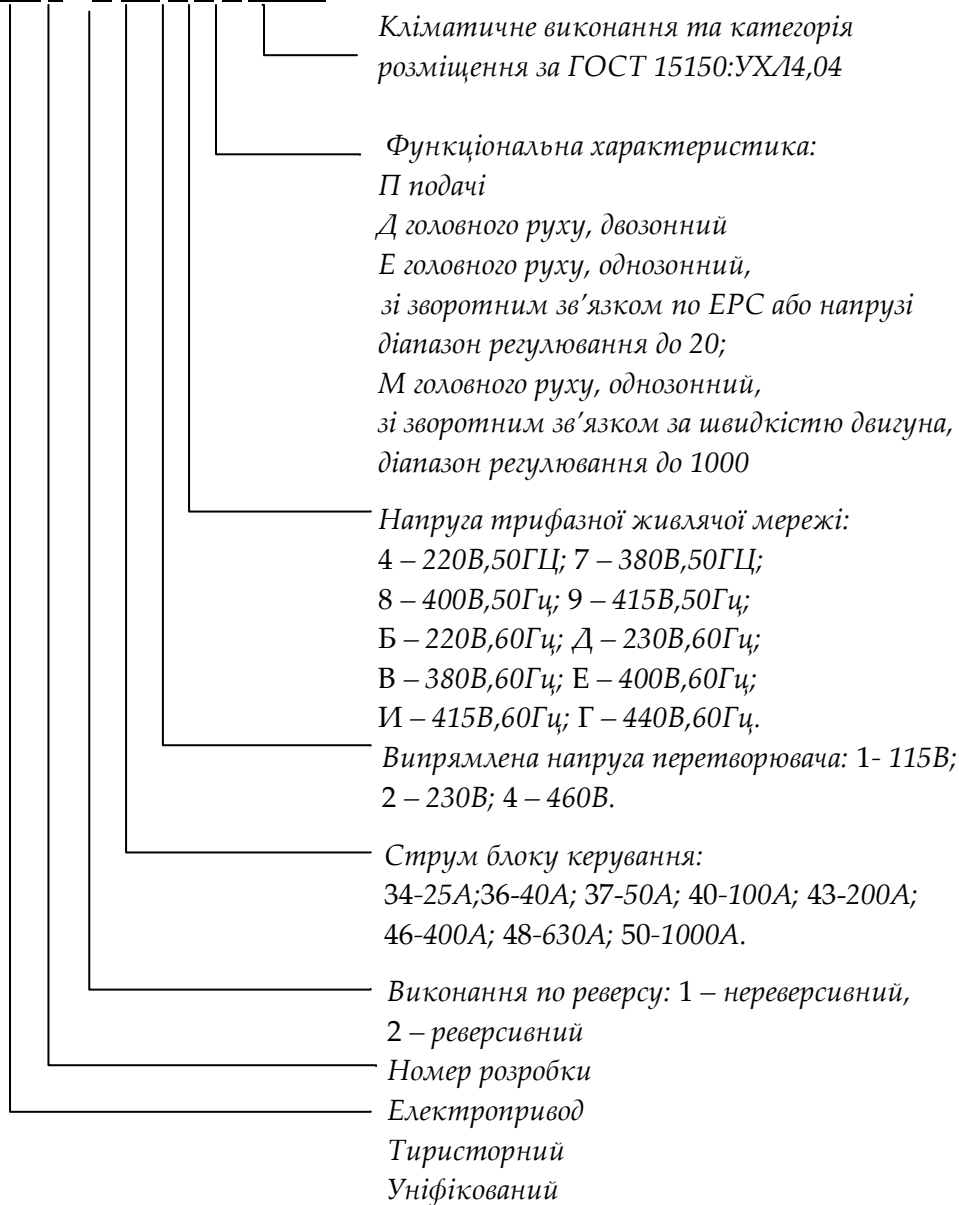
шкафів IP21, IP43 (за завданням Замовника)

Габаритні розміри (Н×В×L), мм min/max

270×163×260 / 470×294×290

Структура умовного позначення електроприводів ЭТУ-2

ЭТУ 2 – X-XX X X X XXXX



**Таблиця В.1 – Технічна характеристика електроприводів
серії ЭТУ-2**

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Струм, А	Тип електродвигуна
4ПНМ200СУХ/14	8,5	220	44,5	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-3727П,Д,Е,М
	8,5	440	22,2	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-3447Д,Е,М
	13,0	220	67,0	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-4027П,Д,Е,М
	13,0	440	33,4	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-3747Д,Е,М
	22,0	220	111	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-4327П,Д,Е,М
	22,0	440	55,6	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-4047Д,Е,М
	36,0	220	181	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-4327П,Д,Е,М
	36,0	440	39,7	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-3747Д,Е,М
	40,0	220	200	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-4327П,Д,Е,М
	60,0	440	149	ЭТУ2-2(ЭТУ2-1)-4347Д,Е,М

Додаток Г (довідковий)

Електропривод змінного струму серії “Вектор-АС”

Призначення та опис

Електропривод змінного струму серії «Вектор-АС», основними складовими частинами якого є напівпровідниковий перетворювач частоти і електродвигун змінного струму, призначені для керування виробничими механізмами в різних галузях промисловості, сільському та комунальному господарстві.

Використання перетворювача частоти в комплекті електроприводу дозволяє:

- знизити витрату електроенергії;
- підвищити стійкість електричної мережі;
- підвищити строк служби електродвигуна та механізму;
- здійснити багатофункціональне керування електроприводом згідно з вимогами технологічного процесу.

Перетворювач частоти виконаний на сучасній елементній базі з використанням мікроконтролерів та оригінального авторського програмного забезпечення. У якості силових елементів використовують IGBT транзистори. Вироби, які відповідають встановленим технічними умовам та вимогам, за показниками технічного рівня можуть бути віднесені до вищої категорії складності.

Основні відмінності

- адаптовано для надійної роботи в складних виробничих умовах; 100% наявність комплектуючих, гарантія технічного обслуговування протягом строку служби (що є проблемою для імпорتنих аналогів);
- вбудована система реєстрації електричних параметрів системи “Візор-3”, на карту пам’яті SD дозволяє забезпечити зручну настройку при пусконаладжувальних роботах і функцію “чорного ящика” при аналізі аварійних ситуацій. Оновлення фірмового програмного забезпечення. Зберігання, відновлення та перенос на однотипові пристрої профілів настройки;
- можливість дистанційного керування по каналу GPRS;
- можливість роботи на багатодвигунних механізмах.

Система керування

Серцем перетворювача частоти серії “Вектор АС” є плата системи векторного керування на базі високопродуктивного сигнального процесора (DSP). Розроблена система включає необхідний комплект апаратних та програмних засобів, які забезпечують зручне налаштування й налаштування електроприводу у різноманітних технологічних умовах.

Для аналізу роботи електроприводу у ньому передбачена система реєстрації параметрів. На карту пам'яті SD записуються основні параметри роботи електроприводу (струм двигуна, частота, напруга, швидкість обертання, показання зовнішніх датчиків й т.п.) при експлуатації у складі технологічного комплексу або в процесі налагодження. Усі параметри записуються із прив'язкою до реального часу, можуть аналізуватися на ПК у вигляді графіків. Ця особливість дає можливість, використовуючи зняті параметри роботи електроприводу, виконати оптимізацію усього технологічного процесу.

Програмне забезпечення може бути модифіковано, з карти пам'яті SD для вирішення нестандартних задач за технічними умовами замовника.

Силова частина

Силова частина перетворювача виконана у вигляді єдиного блока з примусовою вентиляцією, що забезпечує мінімальні розміри. При цьому доступ до необхідних елементів зовнішнього підключення простий та зручний. Конструкція силовій частини дозволяє встановлювати її у оболонки з різним ступенем захисту від впливу навколишнього середовища (IP00...IP54).

Режими роботи

- Ручне регулювання вихідних оборотів електродвигуна з вбудованого або дистанційного пульта керування.
- Ручне регулювання вихідних оборотів електродвигуна з аналогового входу ($\pm 10\text{В}$; 0...20 мА)
- Автоматичне регулювання вихідних оборотів електродвигуна за сигналом з технологічного датчика та використанні внутрішнього ПІ-регулятора (підтримка тиску).

- Плавний розгін та зупинка по заданій кривій (лінійний, U-подібний або S-подібний) для безударного пуску механізмів типу конвеєр, ліфт.

- Розгін з обмеженням за струмом електродвигуна.

- Гальмування з обмеженням генераторного режиму.

- Гальмування електроприводу в генераторному режимі, з віддачею енергії на зовнішній пристрій або динамічне гальмування.

- Векторне керування за потокозчепленням.

- Керування моментом електродвигуна без завдання параметрів схеми заміщення (натяжні механізми).

- Вибір закону керування з постійним моментом або вентиляторним навантаженням.

- Компенсація падіння напруги на активних опорах статорного кола (підвищення моменту на низьких оборотах).

- Компенсація ковзання електродвигуна для підвищення точності завдання швидкості у розімкнених системах.

- Підключення інкрементального датчика швидкості в якості зворотного зв'язку для забезпечення більш точного регулювання оборотів електродвигуна.

- Стабілізація вихідної напруги.

- Вирізання резонансних частот з діапазону регулювання.

- Гнучка настройка дискретних та аналогових входів й виходів.

- Робота в технологічних системах верхнього рівня під керуванням інтерфейсами RS-232, RS-485 або CAN.

Реалізовані захисти

- Від підвищення та зниження напруги у ланці постійного струму.

- Від зниження напруги живлення власних потреб.

- Від перевищення струму в силових модулях IGBT.

- Максимальний струмовий захист.

- Диференціальний захист (пробій ізоляції на землю).

- Обрив однієї з фаз електродвигуна.

- Часо-струмовий захист двигуна (перегрів двигуна).

- Тепловий захист перетворювача.

- Зовнішня аварія (аварійна кнопка, тросовий захист).

- Від порушення функціонування мікроконтролерного ядра.

Основні параметри

Параметри живлячої мережі по ГОСТ 21128, ГОСТ 6697:

- Рід струму трифазний змінний
- Напруга живлення 380 В + 10% -15%
- Частота живлячої мережі 50 Гц±2%

Вихідні параметри перетворювача:

- Число фаз 3
- Номінальна вихідна напруга 380 В
- Діапазон регулювання напруги 0-380 В
- Номінальний вихідний струм перетворювача (табл. Г.1)
- Номінальне навантаження перетворювача (табл. Г.1)
- Номінальна частота 50 Гц
- Діапазон регулювання вихідної частоти перетворювача:
без зовнішніх датчиків швидкості 2,5–100 Гц
з підключеним датчиком швидкості 0,5–100 Гц
- Діапазон регулювання швидкості приводу:
без зовнішніх датчиків швидкості 20:1
з підключеним датчиком швидкості 100:1
- ККД перетворювача 0,97
- Режим роботи тривалий, повторно-короткочасний
- Допустиме перевантаження за струмом $1,5I_n$ протягом 60 с.

Таблиця Г.1 – Номінальний ряд перетворювачів серії
“Вектор-АС”

Типовиконання	Номінальний вихідний струм, А	Номінальна вихідна потужність, кВА	Номінальна потужність на валу двигуна, кВт
ЭП-АС 380/25 УХЛ 4	25	16,5	10
ЭП-АС 380/32 УХЛ 4	32	21	15
ЭП-АС 380/50 УХЛ 4	50	33	22
ЭП-АС 380/80 УХЛ 4	80	53	30
ЭП-АС 380/100 УХЛ 4	100	66	40
ЭП-АС 380/125 УХЛ 4	125	83	60
ЭП-АС 380/160 УХЛ 4	160	105	80
ЭП-АС 380/200 УХЛ 4	200	132	110
ЭП-АС 380/250 УХЛ 4	250	165	150
ЭП-АС 380/315 УХЛ 4	315	208	200
ЭП-АС 380/400 УХЛ 4	400	264	250
ЭП-АС 380/630 УХЛ 4	630	416	315
ЭП-АС 380/800 УХЛ 4	800	528	420

Додаток Д
(довідковий)

Силові сухі трансформатори з литою ізоляцією

Таблиця Д.1 – Загальна характеристика трансформаторів з литою ізоляцією

Тип	Трансформатор з литою ізоляцією
1	2
Матеріал обмотки ВН	Мідь/Алюміній
Матеріал обмотки НН	Мідь/Алюміній
Охолодження	природне повітряне або повітряне з примусовою циркуляцією повітря
Номінальна частота	50 Гц
Фази	3
Максимальна висота установки	Нижче 1000 м над рівнем моря
Найбільша робоча напруга ($U_{\max}$) на ВН	7,2 кВ, 12 кВ, 17,5 кВ, 24 кВ
Короткочасна напруга	20 кВ, 28 кВ, 38 кВ, 50 кВ, 70 кВ (випробувальна U_i , В)
Напруга грозового імпульсу	40/60 кВ, 60/75 кВ, 75-95 кВ, 95-125 кВ, 145-70 кВ (випробувальна U ізоляції)
Найбільша робоча напруга ($U_{\max}$) на НН	1,1 кВ
Короткочасна перемінна	3 кВ (випробувальна напруга ізоляції)
Клас умов навколишнього середовища Клас пожежостійкості Кліматичне виконання	E2/C2/F1
Макс. допустима температура навколишнього повітря	40 °С при цьому середньорічна 20 °С середньодобова 30 °С
Перевищення температури обмоток	100 К

1	2
Групи з'єднань обмоток	Dyn 5
Відгалуження обмоток (на стороні ВН)	$\pm 2 \times 2,5 \%, \pm 5 \%$
Клас ізоляції матеріалів	F
Вимоги/стандарти	VDE 0532 частина 6, IEC 726
Випробування згідно з	VDE 0532 частина 6, у відповідності з IEC 726
Оснащення та аксесуари	2 температурних датчика (РТ 100), стандартне температурне реле (Т-154 Tecsystem), табличка, проушени, болт заземлення, пересувні ролики
Регулювання U здійснюється зі зняттям напруги за допомогою спеціальних перемичок	

**Таблиця Д.2 – Трифазні силові трансформатори з литою
ізоляцією ВН: 6-10 кВ / НН: 0,400 – 0,690 кВ
серії EP RES**

Номинальна потужність, kVA	Втрати потужності, Вт			Струм холодного ходу, I ₀ , А	Напруга КЗ, V _{сс} %	Довжина А, мм	Ширина В, мм	Висота Н, мм	Вага, кг	Акустичне	
	при х.х Р _{хх} , Вт	при к.з. 75°C, Р _{кз} ⁷⁵	при к.з. 120°C, Р _{кз} ¹²⁰							тиск LpA, dB	потужність LwA, dB
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50	380	1780	2000	2,7	6	1080	620	1000	530	50	57
100	530	1880	2200	2,5	6	1100	620	1080	600	50	57
160	680	2500	2900	1,9	6	1200	620	1150	780	51	62
200	800	2850	3200	1,7	6	1300	620	1180	910	52	63
250	900	3300	3800	1,5	6	1350	620	1260	1030	54	64
315	1050	4050	4600	1,4	6	1430	800	1340	1200	55	66
400	1200	4700	5500	1,3	6	1450	800	1400	1380	56	67
500	1400	5800	6700	1,2	6	1500	800	1550	1550	56	68
630	1850	6800	7800	1,2	6	1580	850	1600	1830	57	69
800	2100	8180	9400	1,1	6	1600	850	1700	2150	58	70
1000	2300	9700	11000	1	6	1700	1000	1820	2600	59	72
1250	2700	11400	13000	1	6	1800	1000	1930	3120	60	74
1600	3100	14100	16000	0,9	6	1900	1000	2100	3680	62	76
2000	3900	17000	19000	0,9	6	2000	1300	2220	4300	64	77
2500	5000	20000	23000	0,8	6	2100	1300	2350	5400	65	79

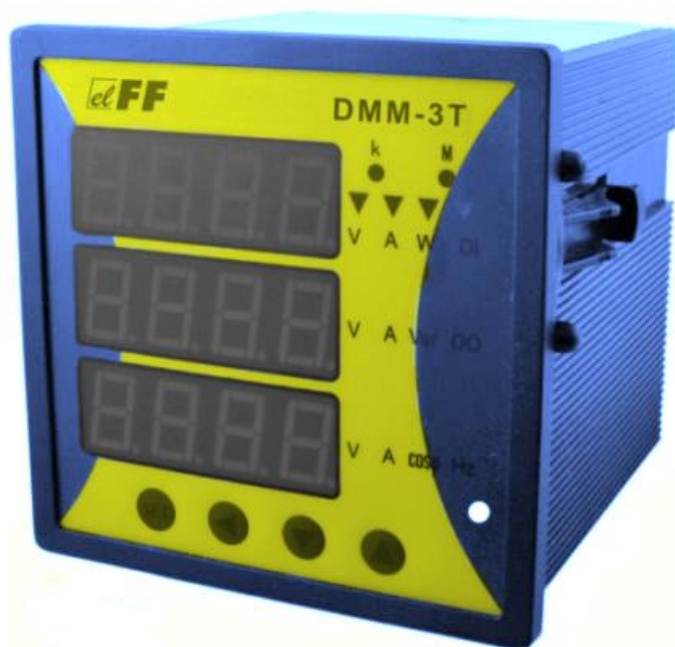


Рис. 1.1 – Цифровий аналізатор



Рис.1.2 – Асинхронний двигун



Рис. 1.20 – Автоматичний вимикач серії АВ3000



Рис. 1.21 – Загальний вигляд реле ДПФ-4

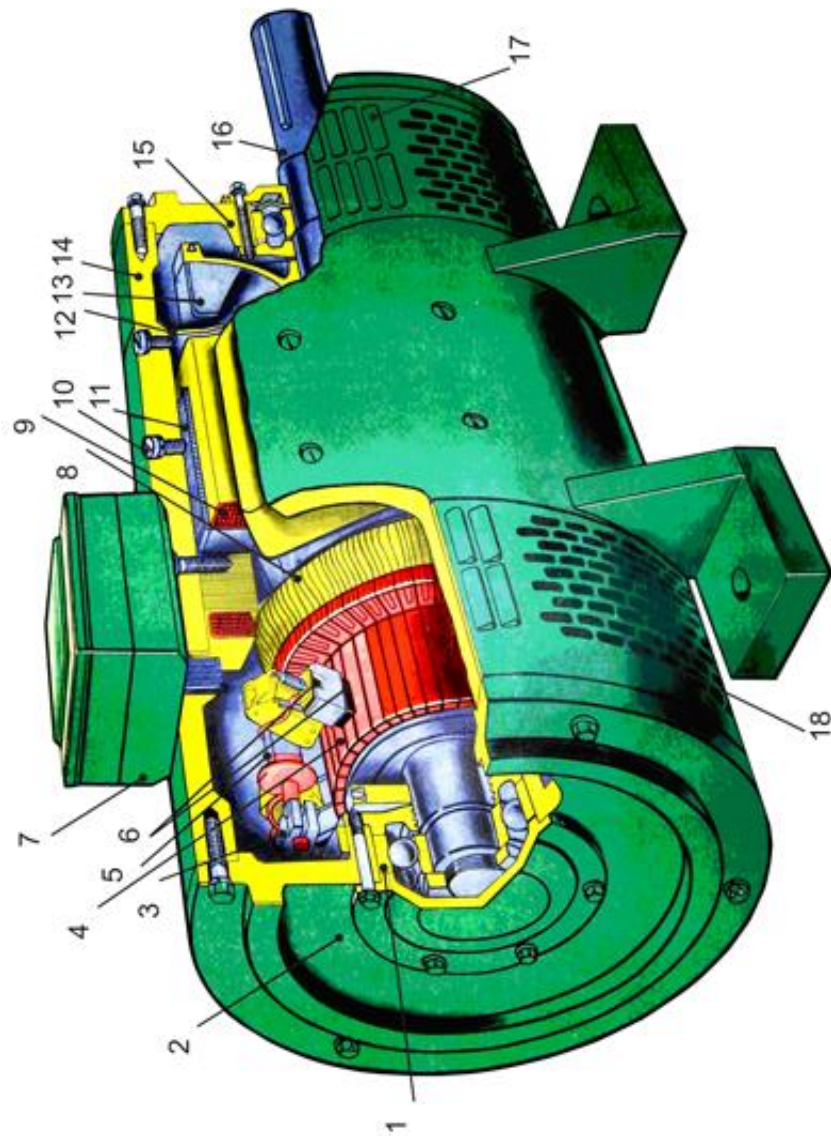


Рис. 2.11 – Машина постійного струму

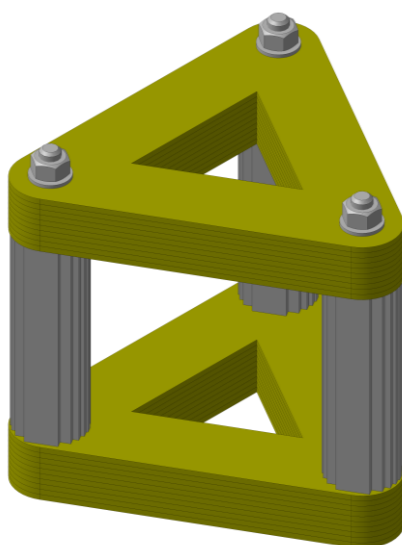


Рис. 3.34 – Просторова структура магнітопроводу

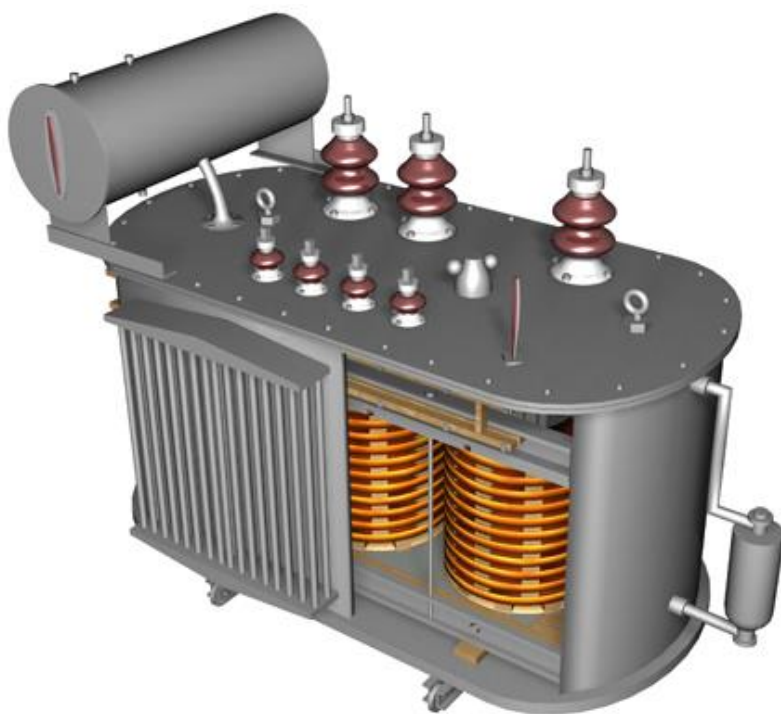


Рис. 3.41 – Будова трифазного масляного трансформатора середньої потужності



Рис. 3.42 – Трансформатор потужністю 630 кВА і напругою 10 кВ
(тип ТМ-630/10)



Рис. 3.42 – Трансформатор потужністю 630 кВА
і напругою 10 кВ (тип ТМГ-630/10)



Рис. 3.44 – Активна частина (без захисного кожуха)
трансформатора з ізоляцією класу 155 °С з алюмінієвими
обмотками потужністю 160 кВА, напругою 15 кВ (тип ТСА-160/15)

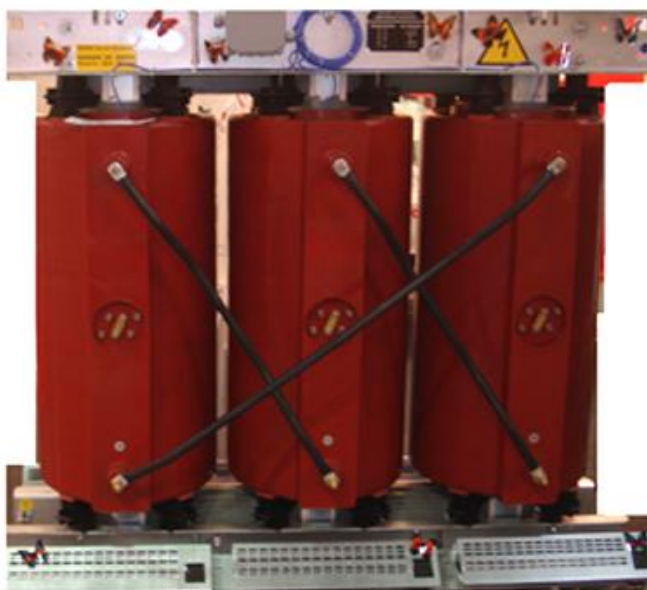
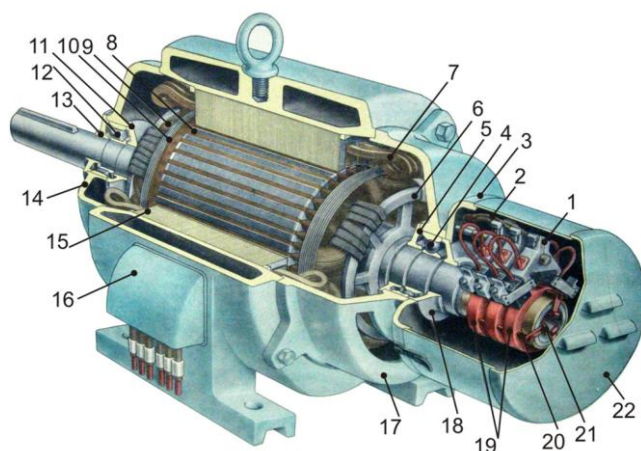


Рис. 3.45 – Активна частина сухого трансформатора з ізоляцією
класу 180°С потужністю 1000 кВА, напругою 10 кВ
(тип ТСЗКУ-1000/10)

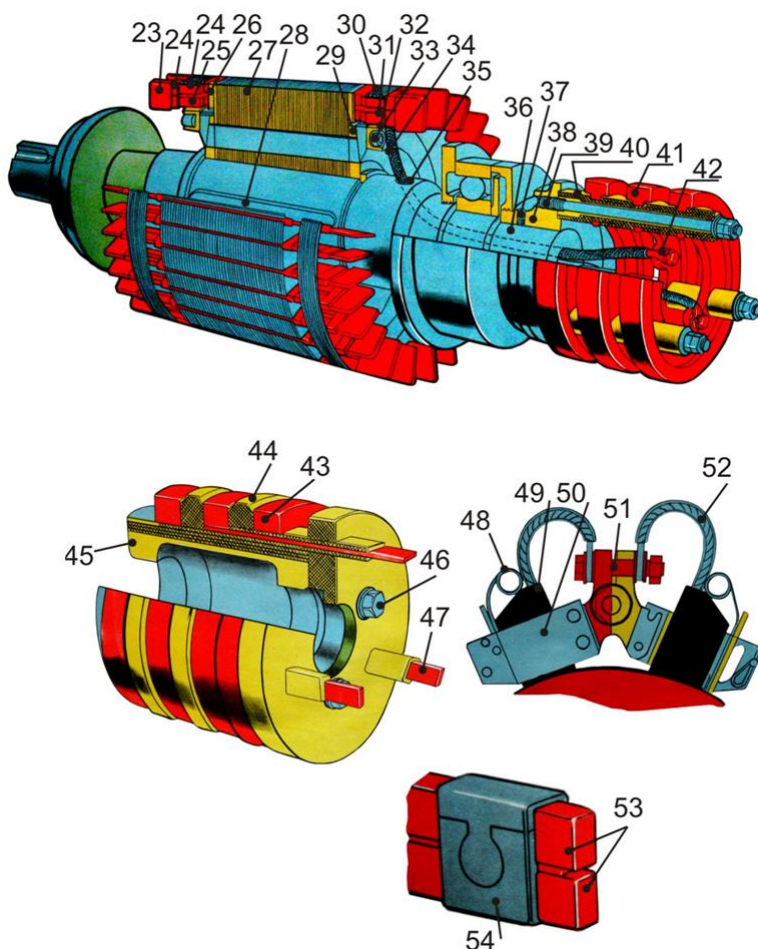


Рис. 3.46 – Трансформатор потужністю 1000 кВА, напругою 10 кВ із литою ізоляцією (тип ТСЗЛ-1000/10)



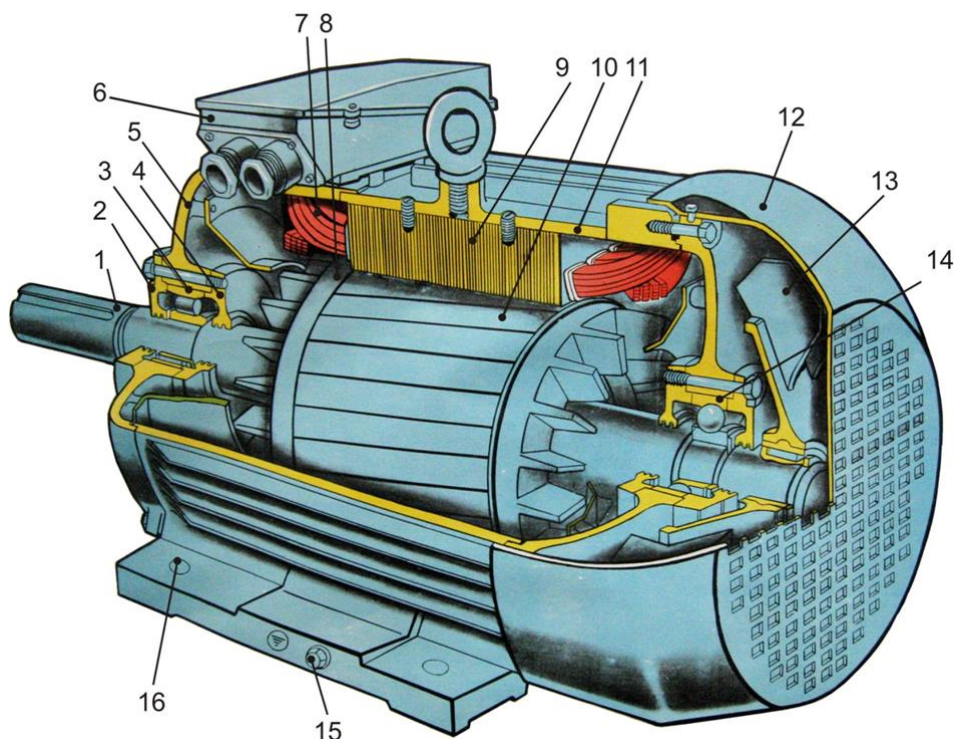
1 – щіточна траверса; 2 – виводи від щіток; 3 – фланець з щіточним пристроєм; 4 – шарикопідшипник; 5 – внутрішня кришка підшипника; 6 – обмоткоутримувач; 7 – обмотка статора; 8 – осердя ротора; 9 – обмотка ротора; 10 – бандаж; 11 – внутрішня кришка підшипника; 12 – роликівий підшипник; 13 – зовнішня кришка підшипника; 14 – передній підшипниковий щит; 15 – статор; 16 – коробка з виводами; 17 – задній підшипниковий щит; 18 – зовнішня підшипникова кришка; 19 – контактні кільця; 20 – контактні стрижні; 21 – виводи обмотки ротора; 22 – кожух

Рис. 4.1 – Поперечний переріз асинхронного двигуна з фазним ротором



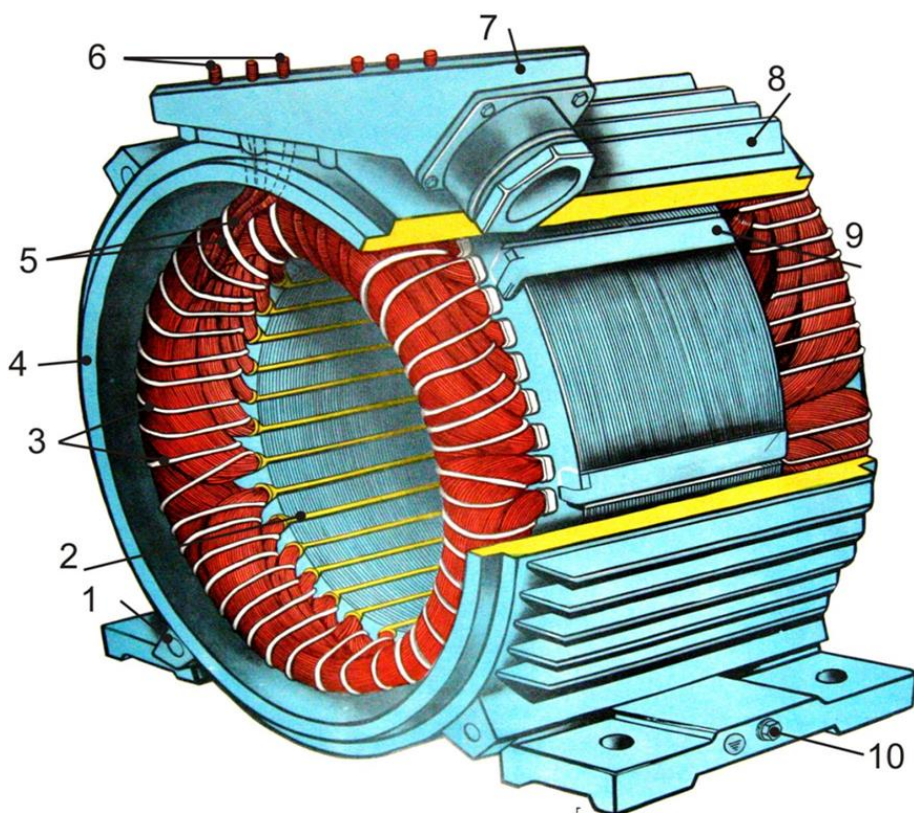
23 – вентиляційна лопатка; 24 – хомутик для з'єднання стрижнів;
 25, 26 – верхні і нижні стрижні; 27 – пазова ізоляція; 28 – магнітопровід
 ротора; 29 – шпонка; 30 – нажимна шайба з обмоткоутримувачем;
 31 – бандаж; 32 – ізоляція між стрижнями; 33 – ізоляція на
 обмоткоутримувачі; 34 – балансувальний тягар; 35 – вивідний кінець
 обмотки; 36 – отвір у валу; 37 – вал; 38 – гвинт; 39 – ступиця контактних
 кілець; 40 – шпилька для кріплення контактних кілець; 41 – ізоляційна
 втулка; 42 – з'єднання вивода з контактним кільцем; 43 – контактне кільце;
 44 – ізоляція між контактними кільцями; 45 – втулка; 46 – болт кріплення
 ізоляційної шайби; 47 – виводи для приєднання обмотки; 48 – пружина;
 49 – щітка; 50 – щіткоутримувач; 51 – болт кріплення щіткоутримувача;
 52 – струмопровідний тросик; 53 – стрижні; 54 – хомутик

Рис. 4.2 – Поперечний переріз фазного ротора асинхронного двигуна



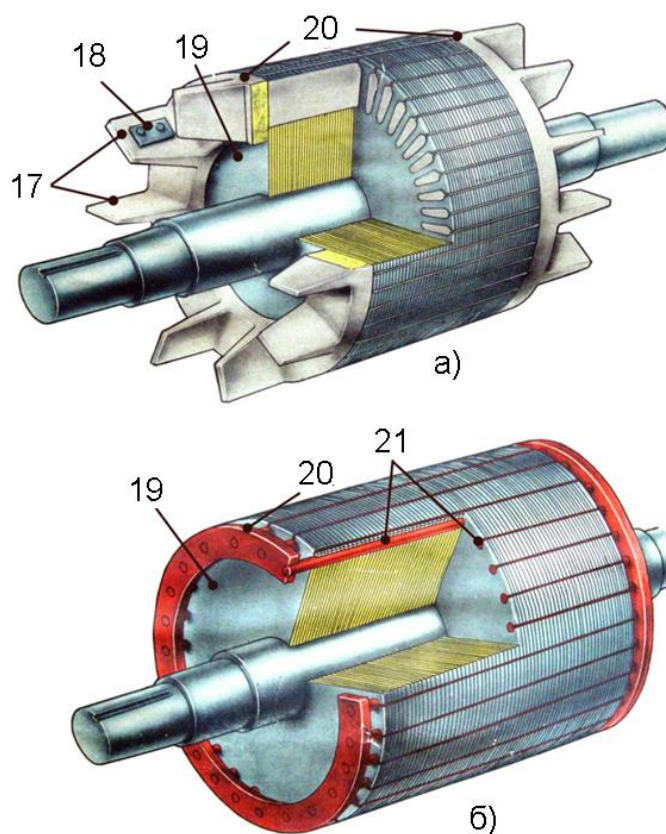
- 1 – вал; 2 – зовнішня кришка підшипника; 3 – роликовий підшипник;
4 – внутрішня кришка підшипника; 5 – підшипниковий щит; 6 – коробка
виводів; 7 – обмотка статора; 8 – обмотка ротора; 9 – осердя статора;
10 – осердя ротора; 11 – кожух електродвигуна; 12 – кожух вентилятора;
13 – вентилятор; 14 – шариковий підшипник; 15 – болт заземлення;
16 – отвори для болта кріплення електродвигуна

**Рис. 4.3 – Асинхронний електродвигун
з короткозамкненим ротором**



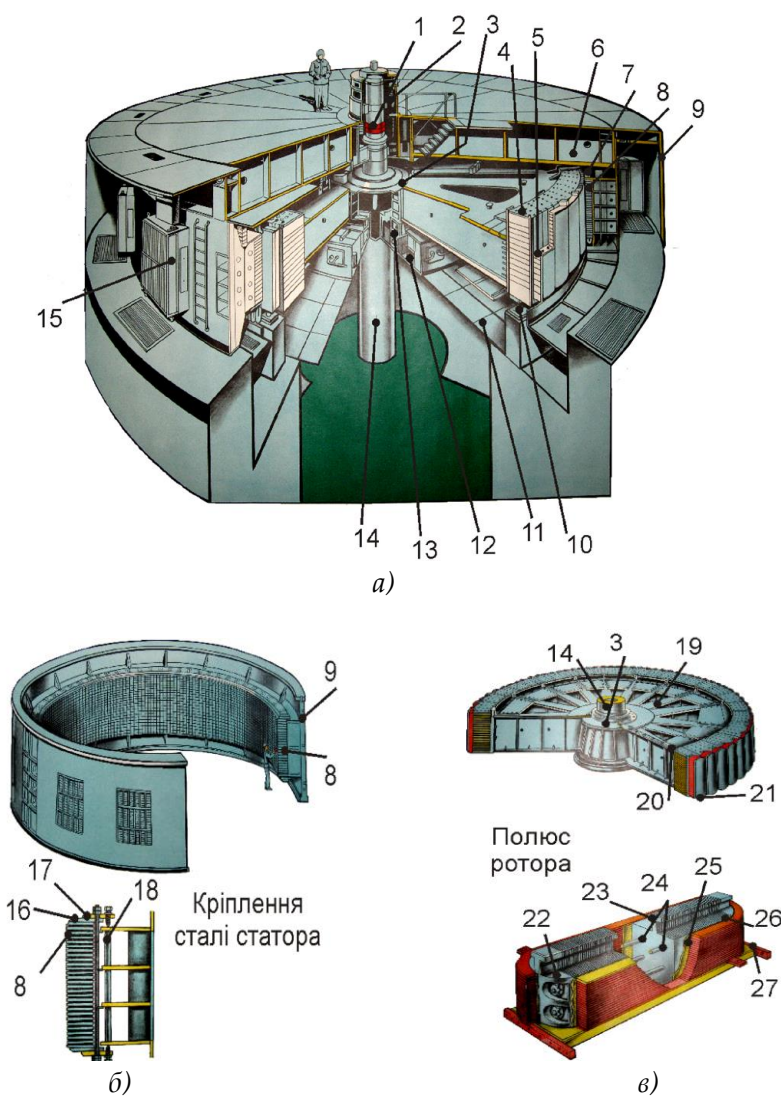
1 – отвори для кріплення підшипникових щитів; 2 – клинова кришка для обмотки в пазу; 3 – бандаж кріплення лобової частини обмоток; 4 – корпус; 5 – вивідні кінці; 6 – контактні болти коробки виводів; 7 – корпус коробки виводів; 8 – оребріння охолодження; 9 – скоби кріплення осердя; 10 – болт заземлення

Рис. 4.4 – Статор асинхронного електродвигуна



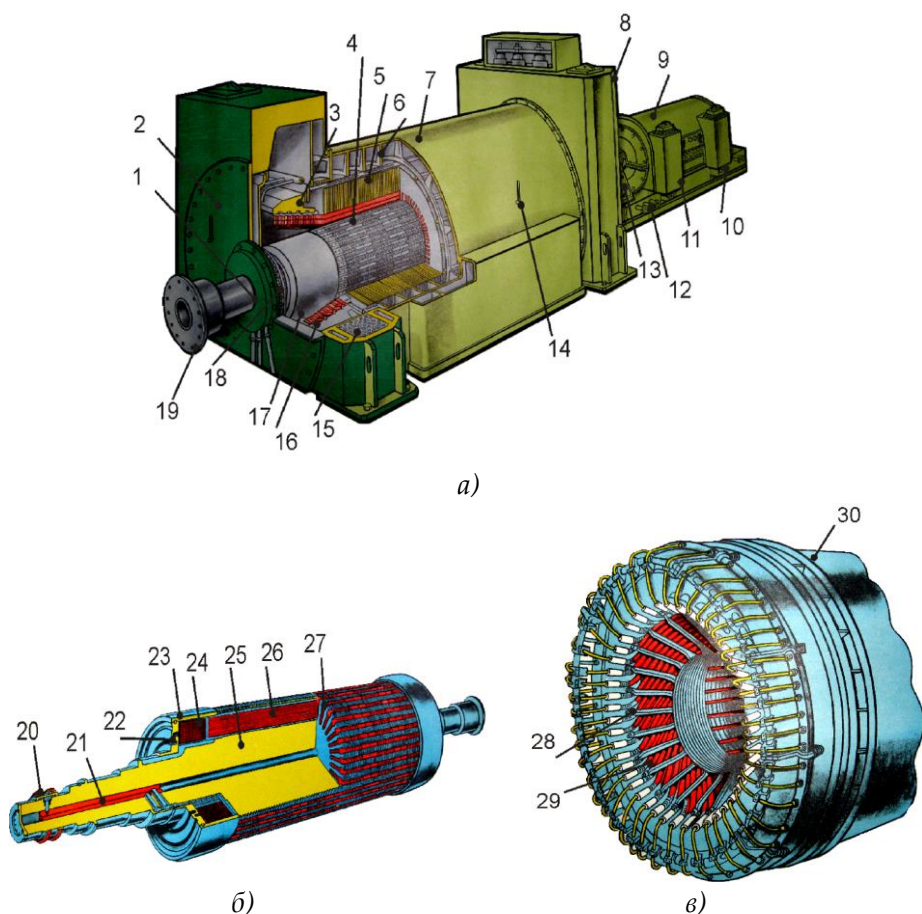
17 – вентиляційні лопатки; 18 – балансувальний тягар;
19 – осердя статора; 20 – короткозамикаючі кільця;
21 – стрижні в пазах

**Рис. 4.5 – Короткозамкнений ротор асинхронного двигуна:
ротор з литою білячою кліткою а);
ротор із звареною білячою кліткою б)**



1 – контактні кільця; 2 – збуджувач; 3 – втулка ротора; 4 – обід ротора;
 5 – полюс; 6 – верхня хрестовина; 7 – обмотка статора; 8 – осердя статора;
 9 – корпус статора; 10 – гальмівний домкрат; 11 – нижня хрестовина; 12 – ванна для масла; 13 – під'ятник; 14 – вал; 15 – повітроохолоджувач; 16 – натискний палець; 17 – натискна плита; 18 – стяжна шпилька; 19 – спиця ротора;
 20 – струмопідвід до обмотки збудження; 21 – полюс ротора; 22 – натискна щока; 23 – Т-подібний хвіст полюса; 24 – стяжні шпильки; 25 – корпусна ізоляція котушки збудження; 26 – осердя полюса; 27 – полюсний наконечник

**Рис. 5.2 – Загальна конструкція гідрогенератора а),
 конструкція статора б) та ротора в)**

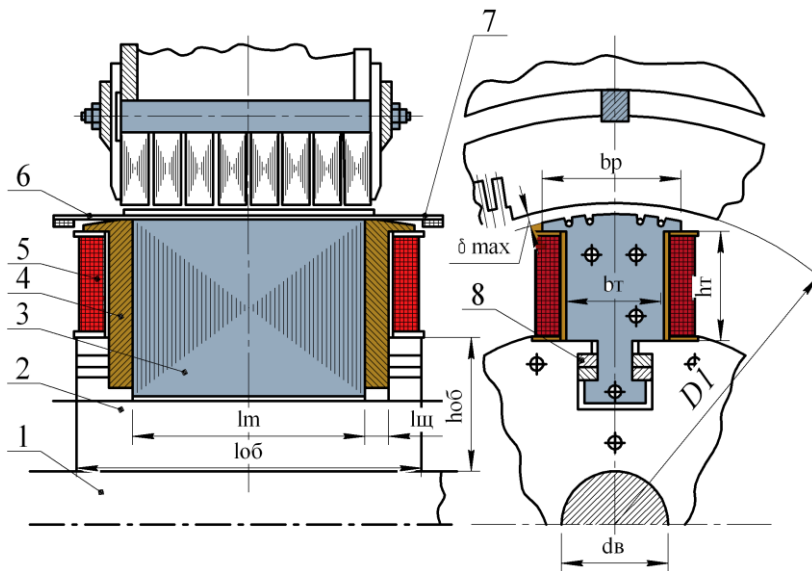


- 1 – ущільнення на валу ротора; 2 – торцевий щит; 3 – кронштейн кріплення обмотки статора; 4 – ротор; 5 – осердя статора; 6 – деталі кріплення осердя статора до корпусу; 7 – корпус турбогенератора; 8 – охолоджувач; 9 – збуджувач; 10 – патрубки для підведення води до охолоджувача; 11 – охолоджувач збуджувача; 12 – маслопровід до підшипника; 13 – стійки підшипника; 14 – термометр; 15 – трубки для циркуляції води в охолоджувачі; 16 – бандажні кільця обмотки статора; 17 – бандажні кільця обмотки ротора; 18 – відцентровий вентилятор; 19 – з'єднувальний фланець; 20 – контактні кільця; 22 – струмопідвід до обмотки збудження; 23 – бандажне кільце; 24 – лобова частина обмотки; 25 – бочка ротора; 26 – пазова частина обмотки ротора; 27 – пазовий клин ротора; 28 – деталі кріплення лобових частин обмотки статора; 29 – лобові частини обмотки статора; 30 – корпус статора

**Рис. 5.3 – Загальна конструкція гідрогенератора а),
конструкція статора б) та ротора в)**



Рис. 5.4 – Синхронний генератор (дизель-генератор)



1 – контактні кільця, 2 – щіткотримачі, 3 – полюсна котушка ротора 4 – полюсний наконечник, 5 – осердя статора, 6 – вентилятор, 7 – вал

Рис. 5.5 – Полюс синхронної машини

Навчальне видання

**ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ КУЦЕНКО
ВАЛЕРІЙ ФЕДОРОВИЧ ЯКОВЛЄВ
ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ СМУРИГІН
ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ КОВАЛЬОВ
АНАТОЛІЙ ВІКТОРОВИЧ ВУЖИЦЬКИЙ**

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ

Навчальний посібник

Українською мовою

Редактор	<i>Н. Цибенко</i>
Комп'ютерна верстка	<i>О. Давиденко</i>
Дизайнер	<i>І. Понайда</i>

Підписано до друку 28.12.2011 р.
Умов. друк. арк. 20,4
Наклад 1000 прим. Зам. № 392

Видавництво “Аграрна освіта”
Технікумівська, 1, смт Немішаєве
Бородянського Київської
тел. 04577-41-2-69

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єкта видавничої справи ДК № 1310