

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

Р. П. Бондар, Г. М. Голенков

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Конспект лекцій

для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Київ 2024

УДК 621.31, 621.3.01, 621.3.02

Б 81

Рецензент С. В. Іносов, канд. техн. наук, доцент

*Затверджено на засіданні навчально-методичної ради
КНУБА, протокол № 8 від 01 червня 2023 року.*

Бондар Р. П., Голенков Г. М.

Б 81 Електротехніка : конспект лекцій / Р. П. Бондар,
Г. М. Голенков. – Київ : КНУБА, 2024. – 172 с.

Викладено основні положення загальної електротехніки, базові поняття теорії електричних та електромагнітних кіл, влаштування електричних машин і апаратів, а також практичні аспекти їх розрахунків. Розглянуто принципи функціонування електричних мереж, систем електропостачання та умови надійного й ефективного використання електротехнічних пристроїв.

Призначено для студентів спеціальності 144 спеціалізації «Енергетичний менеджмент, енергоефективні муніципальні та промислові теплові технології».

УДК 621.31, 621.3.01, 621.3.02

© Р. П. Бондар,
Г. М. Голенков, 2024
© КНУБА, 2024

ВСТУП	5
Лекція 1. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	6
1.1. Основні закони електричних кіл постійного струму	10
1.2. Розрахунок кіл постійного струму	14
Лекція 2. ЗАСТОСУВАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	19
2.1. Електрохімічна дія струму	19
2.2. Теплова дія струму	22
2.3. Системи освітлення постійного струму	24
2.3.1. Принцип роботи світлодіодів	26
2.3.2. Будова LED-лампи	28
Лекція 3. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	31
3.1. Отримання синусоїдної ЕРС	31
3.2. Елементи схем заміщення кіл змінного струму	33
3.2.1. Резистивний елемент	33
3.2.2. Індуктивний елемент	35
3.2.3. Ємнісний елемент	37
3.3 Векторні діаграми	39
Лекція 4. ОДНОФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ	42
4.1. Послідовне з'єднання резистивного, індуктивного та ємнісного елементів	42
4.2. Коло змінного струму з паралельно з'єднаними приймачами	45
Лекція 5. ПОТУЖНІСТЬ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	49
5.1. Потужність резистивного елемента	49
5.2. Потужність індуктивного елемента	50
5.3. Потужність ємнісного елемента	52
5.4. Потужності кола в загальному випадку	52
5.5. Підвищення коефіцієнта потужності в колах змінного струму	55
Лекція 6. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА	59
6.1. Основні поняття і визначення	59
6.2. З'єднання приймачів зіркою	61
6.3. З'єднання приймачів трикутником	65
Лекція 7. ТРАНСФОРМАТОРИ	69
7.1. Основні поняття і визначення	69
7.2. Будова та принцип дії трансформатора	71
7.3. Режим холостого ходу трансформатора	75
7.4. Робота трансформатора з навантаженням	78

7.5. Трифазні трансформатори	83
7.6. Вимірювальні трансформатори	86
Лекція 8. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	88
8.1. Принцип дії машини постійного струму	88
8.2. Будова машини постійного струму	91
8.3. Електрорушійна сила якоря та електромагнітний момент машини постійного струму	93
8.4. Способи збудження машин постійного струму	96
8.5. Генераторний режим роботи МПС	97
8.6. Робота МПС у режимі двигуна	100
Лекція 9. АСИНХРОННІ МАШИНИ	106
9.1. Загальні відомості	106
9.2. Будова асинхронної машини	107
9.3. Принцип дії асинхронної машини	109
9.4. Схема заміщення асинхронної машини	113
9.5. Енергетичні діаграми асинхронної машини	116
9.6. Обертальний момент асинхронної машини	118
9.7. Характеристики асинхронних двигунів	122
Лекція 10. СИНХРОННІ МАШИНИ	126
10.1. Загальні відомості	126
10.2. Принцип дії та будова синхронної машини	127
10.3. Векторна та енергетична діаграми синхронного генератора	133
10.4. Електромагнітний момент синхронної машини	135
10.5. Характеристики синхронних машин	137
Лекція 11. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ	141
11.1. Основні поняття	141
11.2. Загальні технічні характеристики електровимірювальних приладів	143
11.3. Класифікація методів електричних вимірювань	148
11.4. Вимірювальні перетворювачі	149
11.5. Вимірювання неелектричних величин	152
Лекція 12. ОСНОВИ ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	155
12.1. Елементи напівпровідникової техніки	155
12.2. Напівпровідникові випрямляючі пристрої	164
12.3. Інвертори	166
12.4. Перетворювачі частоти змінної напруги	168
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	171

ВСТУП

Навчальним планом спеціальності 144 «Теплоенергетика» передбачено вивчення дисципліни «Електротехніка», до програми якої входять низка тем, що висвітлюють основні положення теорії електричних та електромагнітних кіл, влаштування та принципи роботи електричних машин і апаратів, пристроїв промислової електроніки, систем електропривода й електропостачання.

Метою вивчення дисципліни є підготовка фахівців, здатних розв'язувати технічні задачі та практичні проблеми, пов'язані з використанням електротехнічного обладнання й функціонуванням інженерних мереж.

Під час вивчення дисципліни студенти набувають знань, що дають їм змогу вибирати й ефективно застосовувати електротехнічне обладнання на засадах енергозбереження та екологічної безпеки. Навчаються застосовувати основні теорії, методи, моделі та програмні засоби для вирішення задач цивільної інженерії; проєктувати та реалізовувати технологічні процеси, використовуючи відповідне електротехнічне обладнання, інструменти, методи; використовувати та розробляти технічну документацію, застосовувати сучасні інформаційні технології.

Завданням дисципліни є формування у студентів знань електротехнічних законів, методів аналізу електричних кіл, принципів електропостачання, конструкцій електричних машин, механічних і робочих характеристик електроприводів, набуття практичних навичок підключення електричних машин і апаратів, проведення експериментальних досліджень електричних машин, керування ними та контролю за їх роботою.

Крім теоретичної підготовки, студенти виконують практичні та лабораторні роботи. Це сприяє практичній підготовці студентів, привчає їх до роботи з електричним устаткуванням, а також допомагає закріпити знання, здобуті ними під час вивчення теоретичного курсу.

Лекція 1. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Постійним називається струм, значення і напрямок якого залишаються незмінними, якщо не змінюються параметри електричного кола.

Примітка. Струм (електричний струм провідності) – це спрямований і впорядкований рух електрично заряджених часток (електронів у металах або іонів у газах). Сила струму – це величина, що характеризує кількість електричного заряду, що проходить через поперечний перетин провідника в одиницю часу. Одиницею виміру струму є ампер (А). Якщо струм дорівнює 1 А, то через поперечний перетин провідника за 1 с проходить 1 Кл електрики.

Із техніко-економічних міркувань електрична енергія, що виробляється на електростанціях, розподіляється між приймачами та споживається останніми переважно у вигляді енергії змінного струму. Однак широке застосування має також і постійний струм. Для деяких приймачів постійний струм є єдино можливим родом струму, а іноді його застосування дає змогу істотно поліпшити технічні й експлуатаційні властивості установок.

Електрична енергія постійного струму використовується в електротранспорті, приводах підйомно-транспортних машин, для живлення електролітичних ванн. За допомогою електролізу отримують алюміній, магній, цинк, мідь, водень, кисень, хлор та інші хімічні речовини. У гальванотехніці електроліз застосовують для нанесення тонкого шару металу (нікелю, хрому) на поверхню різних виробів. Постійний струм застосовують також у зварювальних установках, системах освітлення, для живлення пристроїв промислової електроніки, автоматики тощо.

Струм протікає по електричному колу. Це сукупність різних електротехнічних пристроїв (джерел, приймачів, комутаційних пристроїв та ін.), що з'єднуються між собою за допомогою провідників. Прийнято зображати електричні кола у вигляді схем. Розрізняють кілька способів зображення електричних кіл.

На рис. 1.1 наведено принципову схему електричного кола, на якій за допомогою умовних позначень показано такі елементи:

вимикач 1; лампа розжарювання 2; акумулятор 3; вольтметр 4 і амперметр 5.

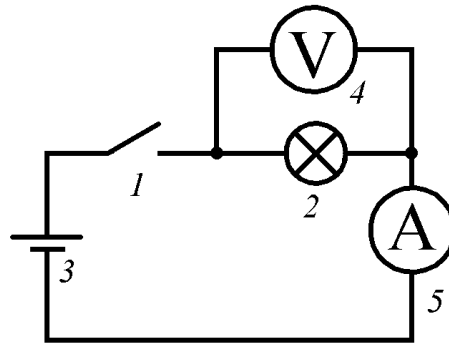


Рис. 1.1. Принципова схема

Принципова схема електричного кола показує призначення всіх електротехнічних пристроїв та їхню взаємодію, тобто пояснює принцип роботи. Але, маючи тільки таку схему, не можна розрахувати режим роботи електротехнічних пристроїв. Для розрахунку електричних кіл використовують схеми заміщення. Для цього всі елементи принципової схеми електричного кола подають у вигляді з'єднань відповідних ідеалізованих елементів. Останні вибираються так, щоб можна було з достатнім наближенням описати процеси в електричному колі. Так, для кола, зображеного на рис. 1.1, схема заміщення в разі розрахунку усталеного режиму набуде вигляду, показаного на рис. 1.2.

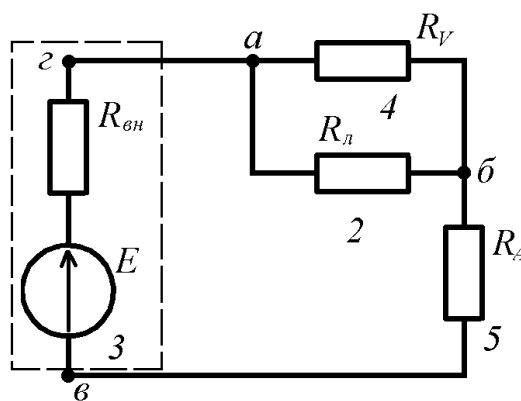


Рис. 1.2. Схема заміщення

Конфігурація схеми заміщення визначається такими геометричними (топологічними) поняттями: вітка, вузол, контур.

Вітка схеми складається з одного або кількох послідовно з'єднаних ідеалізованих елементів, кожний з яких має два виводи (початок і кінець), причому до кінця кожного попереднього елемента приєднується початок наступного. Характерним для вітки є однаковий струм у всіх елементах.

У вузлі схеми з'єднуються три або більше вітки.

Контур – замкнутий шлях, що проходить по кількох вітках так, що жодна вітка і жоден вузол не зустрічається більше одного разу.

Схема заміщення кола на рис. 1.2 містить три вітки, причому дві складаються з одного елемента, а третя – з трьох елементів. На рисунку зазначені параметри елементів: R_L – опір кола лампи, R_V – опір вольтметра, R_A – опір амперметра, E – електрорушійна сила (ЕРС) акумулятора й $R_{вн}$ – його внутрішній опір. Три вітки з'єднані у двох вузлах *а* й *б*.

Примітка. Електрорушійна сила (ЕРС) E – скалярна величина, якою характеризується здатність стороннього поля й індукованого електричного поля викликати електричний струм.

Якщо значення параметрів усіх елементів схеми електричного кола відомі, то, користуючись законами електротехніки, можна розрахувати режим роботи всіх її елементів, тобто визначити електричний стан усіх електротехнічних пристроїв.

Для проведення розрахунку й аналізу електричних кіл необхідно знати не тільки значення ЕРС, напруг або струмів, але й їхні напрямки, тому що останні визначають знаки доданків у розрахункових виразах. Тому варто нагадати про напрямки струмів, напруг і ЕРС, застосовуваних у фізиці.

Напрямок струму вважають напрямком руху позитивних зарядів.

Напрямок напруги між якими-небудь точками електричного кола вважають напрямком, у якому переміщалися б позитивні заряди між цими точками під дією сил електричного поля, тобто від більшого потенціалу до меншого.

Примітка. Потенціал – енергетична характеристика поля, що є скалярною величиною, чисельно рівній роботі поля з переміщення

одиночного заряду із цієї точки в нескінченно віддалену точку, потенціал якої дорівнює нулю. Різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ називається напругою U , і вона чисельно дорівнює роботі поля з переміщення одиночного заряду з точки, що має потенціал φ_1 у точку з потенціалом φ_2 . Напруга й потенціал у системі СІ вимірюються у вольтах (В). Якщо під час переміщення заряду 1 Кл між двома точками кола виконується робота в 1 Дж, то напруга між цими точками дорівнює 1 В.

Напрямок ЕРС між виводами джерела або активного приймача вважають напрямком, у якому переміщалися б позитивні заряди під дією сил стороннього поля, тобто від меншого потенціалу до більшого.

Так, в електричному колі, показаному на рис. 1.2, потенціал точки z більше ніж потенціал точки v ($\varphi_z > \varphi_v$), тому напруга спрямована від точки z до точки v , а ЕРС – від точки v до точки z .

На ділянці $gabv$, що містить пасивні елементи, позитивні заряди переміщуються під дією сил електричного поля від більшого потенціалу до меншого й напрямки напруги та струму на цій ділянці збігаються. На ділянці vz , що містить джерело електричної енергії, позитивні заряди переміщаються під дією сил стороннього поля від меншого потенціалу до більшого, і напрямком струму на цій ділянці збігається з напрямком ЕРС і протилежний напрямку напруги.

Розрахунок і аналіз будь-яких електричних кіл може бути виконаний за допомогою основних законів електричних кіл: закону Ома, першого та другого законів Кірхгофа. Зазначені закони використовуються також для обґрунтування різних методів, які спрощують розрахунок і аналіз електричних кіл.

Запис виразів за законами Ома й Кірхгофа, а також розрахункових формул здійснюється з урахуванням певних напрямків як заданих величин (наприклад, ЕРС, напруг або струмів), так і величин, що підлягають визначенню.

Додатними напрямками заданих і шуканих величин у колах постійного струму вважаються їхні дійсні напрямки. Якщо вони не очевидні, можна задатися додатними напрямками довільно, тому

що від вибору тих або інших додатних напрямків залежать лише знаки шуканих величин, а не їхні значення.

Як додатні напрямки величин, що змінюють свої дійсні напрямки із часом, наприклад під час розрахунку або аналізу кіл змінного струму, задають одне з двох можливих їхніх напрямків, з урахуванням якого й роблять розрахунок.

Якщо за результатами розрахунку або аналізу яка-небудь із шуканих величин виявляється додатною, це означає, що вона спрямована в дійсності так, як задано; від'ємне значення шуканої величини вказує на її протилежний напрямок. Теж саме стосується й величин, що змінюються з часом.

1.1. Основні закони електричних кіл постійного струму

Закон Ома для ділянки електричного кола визначає залежність між струмом і напругою ділянки. Згідно із цим законом для пасивної ділянки, яка не має джерел енергії, цей зв'язок запишеться у вигляді

$$U = IR, \quad (1.1)$$

де R – опір ділянки.

На рис. 1.3 наведено схему електричного кола, у якому виділена нерозгалужена ділянка (ab), що містить послідовно ввімкнені резистивні елементи R_1 і R_2 та джерела ЕРС – E_1 , E_2 .

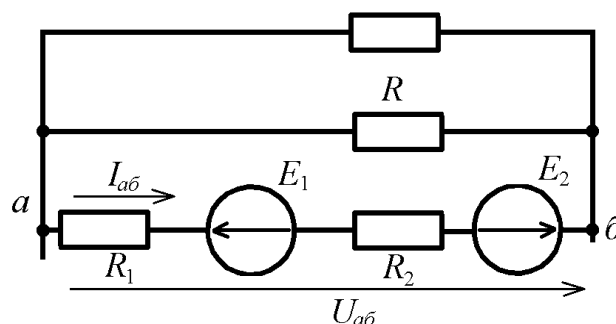


Рис. 1.3. Схема електричного кола

Для нерозгалуженої ділянки електричного кола, що містить довільне число резистивних елементів і джерел напруги, за узагальненим законом Ома

$$I_{a\bar{b}} = \frac{U_{a\bar{b}} - \sum E}{\sum R} = \frac{U_{a\bar{b}} - E_1 + E_2}{R_1 + R_2}, \quad (1.2)$$

де передбачається, що додатні напрямки струму й напруги на ділянці обрані співпадаючими; $\sum R$ – арифметична сума опорів усіх резистивних елементів; $\sum E$ – алгебраїчна сума ЕРС усіх джерел. Причому ЕРС, напрямки яких збігаються з вибраним додатним напрямком струму, записуються зі знаком плюс, а ЕРС, напрямки яких протилежні додатному напрямку струму, записуються зі знаком мінус.

Закони Кірхгофа, які іноді називають правилами Кірхгофа, – це основні закони електричних кіл. Обидва закони були встановлені на підставі численних дослідів.

Відповідно до першого закону (закону Кірхгофа для струмів) алгебраїчна сума струмів у будь-якому вузлі електричного кола дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (1.3)$$

тобто у будь-якому вузлі електричного кола сума струмів спрямованих до вузла, дорівнює сумі струмів спрямованих від вузла. Наприклад, для вузла електричного кола на рис. 1.4

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5$$

або

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = \sum_{k=1}^5 I_k = 0.$$

Цей закон є наслідком того, що у вузлах електричного кола заряди не можуть накопичуватися, оскільки у зворотному разі змінювалися б потенціали вузлів і струми у вітках.

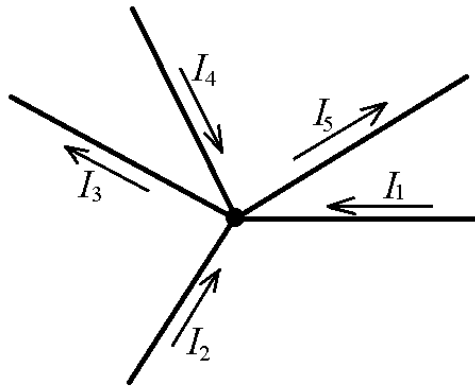


Рис 1.4. Перший закон Кірхгофа

Відповідно до другого закону (закону Кірхгофа для напруг) у будь-якому контурі схеми електричного кола алгебраїчна сума напруг на всіх резистивних елементах дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС

$$\sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k = \sum_{k=1}^n E_k, \quad (1.4)$$

де m – кількість резистивних елементів у контурі, n – кількість ЕРС.

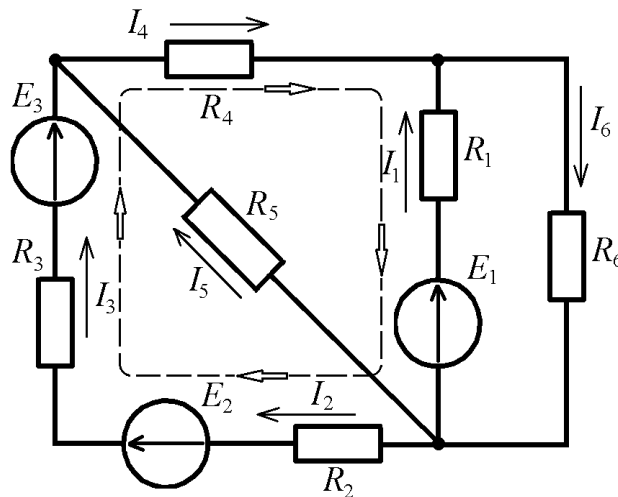


Рис 1.5. Другий закон Кірхгофа

У рівнянні (1.4) зі знаком плюс записуються струми й ЕРС, напрямки яких збігаються з довільно вибраним напрямком обходу контуру. Наприклад, для зазначеного на рис. 1.5 контуру і зазначеного стрілкою напрямку обходу другий закон Кірхгофа запишеться у вигляді

$$-R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = \sum_{k=1}^4 R_k I_k = \sum_{k=1}^3 E_k = -E_1 + E_2 + E_3.$$

Під час проходження електричного струму по провіднику виконується робота з переміщення зарядів. Чим більший струм і чим більший опір проходженню струму, тим більшу роботу потрібно виконати. Робота, що виконується під час переміщення позитивного заряду Q вздовж деякої нерозгалуженої ділянки електричного кола, яка не має джерел електричної енергії, дорівнює добутку цього заряду на напругу U між кінцями ділянки

$$A = QU.$$

За умови рівномірного руху заряду впродовж часу t , тобто якщо струм I є постійним, заряд дорівнює

$$Q = It.$$

Отже, зроблена за час t робота

$$A = UIt.$$

Основною одиницею роботи в системі СІ слугує джоуль (Дж),
 $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}.$

Відношенням роботи A до відповідного проміжку часу t визначають потужність

$$P = A/t = UI, \quad (1.5)$$

тобто потужність характеризує швидкість, з якою відбувається робота.

Основною одиницею потужності в системі СІ є ват (Вт),
 $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}.$ Це потужність, за якої за одну секунду відбувається робота в 1 Дж. Оскільки джоуль досить невелика одиниця роботи, на практиці використовують також кіловат-години (кВт·г), причому $1 \text{ кВт} \cdot \text{г} = 3\,600\,000 \text{ Дж}.$

У будь-якому електричному колі наявний енергетичний баланс, який може бути виражений через *баланс потужностей*: алгебраїчна сума потужностей усіх джерел енергії (зокрема, джерел струму й джерел ЕРС або напруги) дорівнює арифметичній сумі потужностей усіх приймачів енергії (зокрема, резистивних елементів).

$$\sum U_{\text{дж}} I_{\text{дж}} = \sum R I_R^2 \text{ або } \sum P_{\text{дж}} = \sum P_R. \quad (1.6)$$

Потужність джерела потрібно вважати додатною й записувати в рівнянні балансу потужностей (1.6) зі знаком плюс, якщо додатний напрямок струму $I_{дж}$ збігається з напрямком дії ЕРС. У зворотному разі ця потужність вважається від'ємною і записується зі знаком мінус.

Як приклад, складемо баланс потужностей для електричного кола за рис. 1.5, вважаючи, що всі джерела ідеальні, тобто внутрішній опір джерела дорівнює нулю й $U_{дж} = E$:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2.$$

1.2. Розрахунок кіл постійного струму

Для розрахунку й аналізу електричних кіл застосовуються різні методи. Використовуючи перший і другий закони Кірхгофа, можна для будь-якого електричного кола скласти потрібну кількість незалежних рівнянь і за допомогою їх спільного вирішення знайти всі величини, які підлягають визначенню, наприклад струми. Вирішуючи спільно рівняння, можна встановити також залежність між якими-небудь величинами: між струмом і ЕРС, між двома струмами тощо.

Перед складанням рівнянь потрібно зазначити на схемі додатні напрямки відомих і невідомих величин. Спочатку варто скласти більш прості рівняння за першим законом Кірхгофа, максимальна кількість яких повинна бути на одиницю менше кількості вузлових точок. Решту рівнянь слід скласти за другим законом Кірхгофа.

Для спрощення розрахункових рівнянь та зменшення їхньої кількості також використовують інші методи: метод контурних струмів, вузлової напруги, суперпозиції, метод еквівалентного генератора й ін.

У тому разі, коли в розгалуженому електричному колі з кількома джерелами є група активних або пасивних елементів з'єднаних послідовно або паралельно, для спрощення розрахунку й

аналізу доцільно замінити їх відповідно одним еквівалентним пасивним або одним активним елементом.

Послідовним називається таке з'єднання елементів, коли умовний кінець першого елемента з'єднується з умовним початком другого, кінець другого – з початком третього і т. д. Характерним для послідовного з'єднання є однаковий струм у всіх елементах.

Загалом за послідовного з'єднання n резистивних елементів (рис. 1.6) струм у колі, напруги на елементах і споживані ними потужності визначаються такими співвідношеннями:

$$I = U / \sum_{k=1}^n R_k = U / R_e; U_k = IR_k; P_k = IU_k = I^2 R_k,$$

де $k = 1, 2, \dots, n$ – номер елемента; $R_e = \sum_{k=1}^n R_k$ – еквівалентний опір кола.

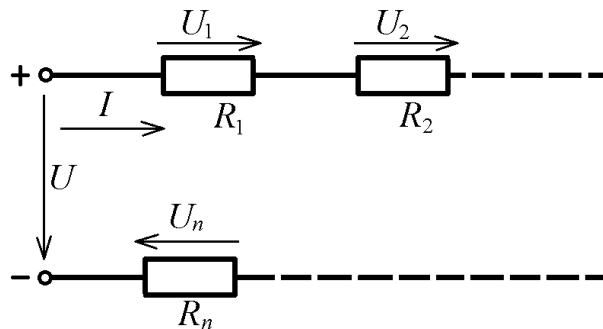


Рис. 1.6. Послідовне з'єднання резистивних елементів

Напруга і потужність усього кола:

$$U = \sum_{k=1}^n U_k = I \sum_{k=1}^n R_k; P = \sum_{k=1}^n P_k = UI = I \sum_{k=1}^n U_k = I^2 \sum_{k=1}^n R_k.$$

Приймачі електричної енергії послідовно зазвичай не з'єднуються, тому що при цьому потрібне узгодження номінальних даних приймачів, унеможлиблюється незалежне їх увімкнення й вимкнення, а в разі виходу з ладу одного з приймачів вимикаються також інші приймачі. Тому найчастіше їх вмикають паралельно.

Паралельним називається таке з'єднання елементів, за якого з'єднуються між собою як умовні початки всіх елементів, так і їхні кінці (рис. 1.7). Характерним для паралельного з'єднання є та сама напруга U на виводах усіх елементів. Паралельно з'єднуються

зазвичай приймачі електричної енергії та інші елементи електричних кіл, розраховані на ту саму напругу. За паралельного з'єднання не потрібно узгоджувати номінальні дані приймачів, можливі вмикання й вимикання будь-яких приймачів незалежно від інших, а в разі виходу з ладу якого-небудь приймача інші залишаються ввімкненими.

Струми й потужності паралельно з'єднаних віток не залежать один від одного і визначаються виразами:

$$I_k = U/R_k = UG_k; P_k = UI_k = U^2/R_k = U^2G_k = I_k^2 R_k.$$

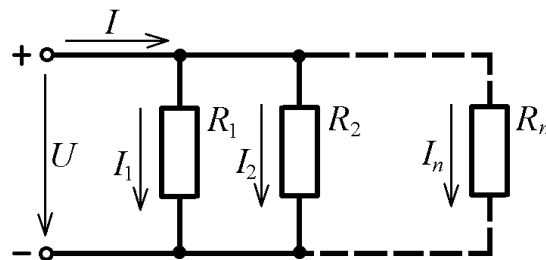


Рис. 1.7. Паралельне з'єднання резистивних елементів

Струм і потужність усього кола

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = U \sum_{k=1}^n 1/R_k = U \sum_{k=1}^n G_k = UG_e = U/R_e;$$

$$P = \sum_{k=1}^n P_k = UI = U \sum_{k=1}^n I_k = U^2 G_e = U^2/R_e = I^2 R_e,$$

де $G_k = 1/R_k$ – провідність окремого елемента; $G_e = \sum_{k=1}^n G_k$ – еквівалентна провідність; $R_e = 1/G_e$ – еквівалентний опір.

Примітка. Провідністю називається величина, обернена до опору. Вимірюється в сименсах (См).

Змішаним, або послідовно-паралельним, називається таке з'єднання елементів, за якого на одних ділянках електричного кола вони з'єднані паралельно, а на інших – послідовно.

Аналіз і розрахунок електричних кіл зі змішаним з'єднанням резистивних елементів виконується найчастіше за допомогою їх попередніх перетворень. На рис. 1.8 показано приклад змішаного з'єднання та схеми еквівалентних йому кіл, у яких паралельно та послідовно з'єднані елементи замінюються еквівалентними.

У всіх випадках заміни заданих електричних схем еквівалентними схемами іншого виду потрібно виконувати умову *незмінності струмів і напруг у тих частинах схеми, які не порушені перетвореннями.*

У схемі, показаній на рис. 1.8, два приймача з опорами R_1 і R_2 з'єднані паралельно. Еквівалентна провідність двох резистивних елементів дорівнює

$$G_{e1} = \sum_{k=1}^2 G_k = G_1 + G_2 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{e1}},$$

звідки еквівалентний опір

$$R_{e1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Відповідне еквівалентне коло показано на рис. 1.8, б.

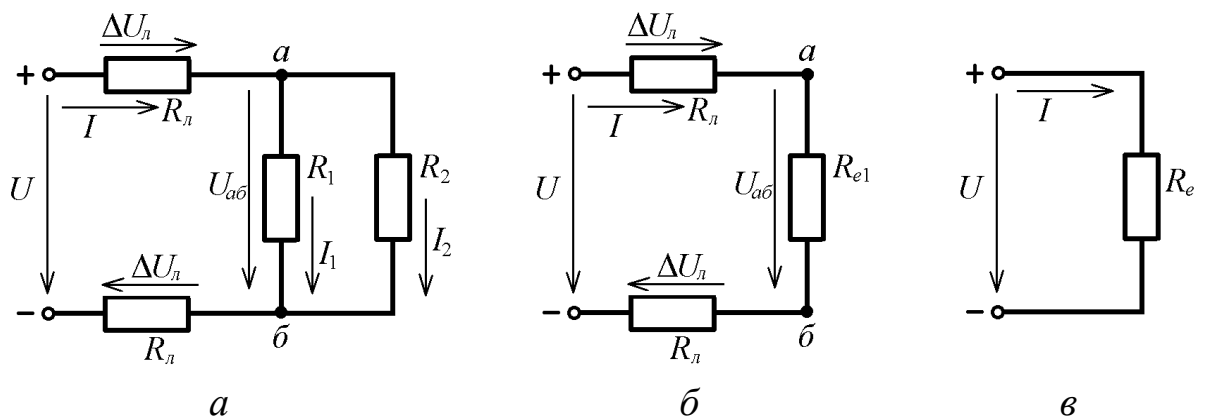


Рис. 1.8. Схема електричного кола (а) і схеми еквівалентних йому кіл (б і в)

Опір лінії R_l , за допомогою якої приймачі приєднуються до мережі, приєднаний послідовно до опору R_{e1} , тому

$$R_e = \sum_{k=1}^3 R_k = 2R_l + R_{e1}.$$

Проведене перетворення дає змогу визначити струм, який протікає в лінії

$$I = U / R_e.$$

Тепер за схемою на рис. 1.8, б можемо визначити напругу приймачів

$$U_{a\delta} = IR_{e1},$$

а також падіння напруги в лінії

$$2\Delta U_l = 2IR_l.$$

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення закону Ома для всього кола.
2. У яких режимах може працювати джерело?
3. Як розраховують потужність (роботу) електричного струму?
4. Запишіть основні співвідношення для визначення ККД електричного кола.
5. Поясніть загальні властивості послідовного з'єднання елементів кола.
6. Поясніть загальні властивості паралельного з'єднання елементів кола.
7. У чому суть методу еквівалентного перетворення?
8. Поясніть фізичний зміст першого (другого) закону Кірхгофа.
9. Скільки незалежних рівнянь можна скласти за першим законом Кірхгофа для схеми довільної конфігурації?
10. Скільки незалежних рівнянь можна скласти за другим законом Кірхгофа для схеми довільної конфігурації?
11. Поясніть алгоритм знаходження невідомих струмів для схеми довільної конфігурації за першим і другим законами Кірхгофа.

Лекція 2. ЗАСТОСУВАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1. Електрохімічна дія струму

Електроліз – розклад речовин (наприклад води, розчинів кислот, лугів, розчинених або розплавлених солей тощо) постійним електричним струмом.

Хімічні зміни, спричинені пропусканням електричного струму через розплавлену іонну сполуку або через розчин, який містить іони. Їх зумовлює сукупність хімічних реакцій, що протікають під дією електричного струму на електродах (аноді та катоді), занурених в електроліт. При цьому на катоді відбувається відновлення, а на аноді – окислення іонів електроліту.

Унаслідок електролізу на електродах виділяються речовини в кількостях, пропорційних кількості пропущеного струму. Електроліз застосовується для одержання багатьох речовин (металів, водню, хлору та ін.), у гальваностегії (нанесенні металічних покриттів), гальванопластиці (відтворенні форми предметів), а також у хімічному аналізі (полярографія).

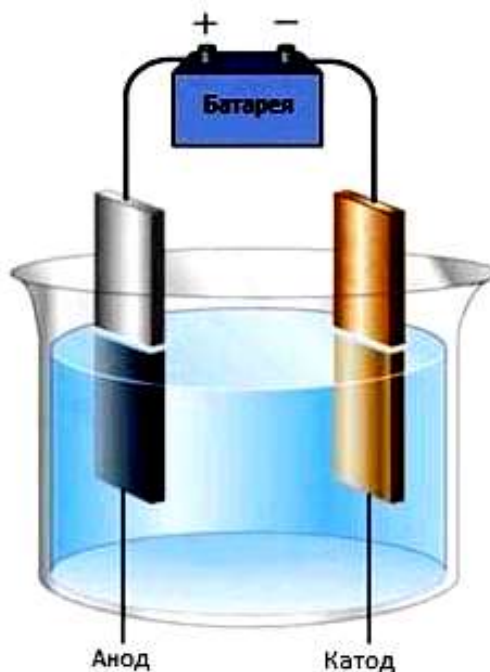


Рис. 2.1. Схематичне зображення електролітичної ванни

Реакції, які відбуваються під час електролізу на електродах, називаються вторинними. Первинними є реакції дисоціації в електроліті. Розділення реакцій на первинні й вторинні дало змогу Майклу Фарадею встановити закони електролізу.

Перший закон електролізу Фарадея говорить про те, що маса m речовини, що виділяється на електроді, прямо пропорційна електричному заряду Q , який пройшов через електроліт:

$$m = kQt, \quad (2.1)$$

де t – час протікання постійного струму; k – коефіцієнт пропорційності, який називається електрохімічним еквівалентом речовини і залежить від її хімічної природи.

Примітка. Другий закон електролізу Фарадея уточнює поняття електрохімічного еквіваленту й записується у вигляді

$$m = \frac{MIt}{nF},$$

де M – молярна маса речовини, г/моль; I – сила струму, А; F – стала Фарадея, Кл·моль⁻¹; n – кількість електронів, що бере участь у процесі.

У хімічній промисловості електролізом одержують хлор, фтор, луги, хлорат і перхлорат, надсірчану кислоту (кислота Каро H_2SO_5) і персульфати, хімічно чисті водень і кисень тощо. При цьому одні речовини одержують за допомогою відновлення на катоді, інші – окисленням на аноді.

У кольоровій металургії електроліз використовується для добування металів із руд та їх очищення. Електролізом із розплавів отримують алюміній, магній, титан, цирконій, уран, берилій та ін. Для рафінування (очищення) металу електролізом із нього відливають пластини і поміщають їх як аноди в електролізер. Під час пропускання струму метал, що підлягає очищенню, піддається анодному розчиненню, тобто переходить у розчин у вигляді катіонів. Потім ці катіони металу розряджаються на катоді, завдяки чому утворюється компактний осад уже чистого металу. Домішки, що містяться в аноді, або залишаються нерозчинними, або переходять в електроліт і видаляються.

Гальванотехніка – розділ прикладної електрохімії, що займається процесами нанесення металевих покриттів на поверхню

як металевих, так і неметалевих виробів під час проходження постійного електричного струму через розчини їх солей. Гальванотехніка ділиться на гальваностегію і гальванопластику.

Гальваностегія – це електричне осаджування на поверхню металу іншого металу, який міцно зв'язується (зчіплюється) з покриваючим металом (предметом), що слугує катодом електролізера.

Способом гальваностегії можна покрити деталь тонким шаром золота або срібла, хрому чи нікелю. За допомогою електролізу можна наносити найтонші металеві покриття на різні металеві поверхні. За такого способу нанесення покриттів деталь використовують як катод, який міститься в розчині солі того металу, покриття з якого потрібно отримати. Як анод використовується пластина з того самого металу.

Гальванопластика – одержання за допомогою електролізу точних металевих копій значної товщини з різних як неметалічних, так і металевих предметів, які називаються матрицями.

За допомогою гальванопластики виготовляють бюсти, статуї тощо. Гальванопластика використовується для нанесення порівняно товстих металевих покриттів на інші метали (наприклад, утворення «накладного» шару нікелю, срібла, золота і т. ін.).

Крім зазначених вище, електроліз знайшов застосування і в інших галузях: отримання оксидних захисних плівок на металах (анодування); електрохімічна обробка поверхні металевого виробу (поліровка); електрохімічне фарбування металів (наприклад міді, латуні, цинку, хрому та ін.); очищення води – видалення з неї розчинних домішок (унаслідок чого виходить так звана м'яка вода, що за своїми властивостями наближається до дистильованої); електрохімічна заточка ріжучих інструментів (наприклад, хірургічних ножів, бритв і т. ін.).

2.2. Теплова дія струму

Під час проходження електричного струму по провіднику внаслідок зіткнень вільних електронів або іонів із його атомами провідник нагрівається. Кількість тепла, що виділяється в провіднику під час проходження електричного струму, визначається законом Джоуля – Ленца

$$Q = I^2 R t, \quad (2.2)$$

згідно з яким кількість теплоти Q , що виділяється в провіднику, прямо пропорційна квадрату струму I , опору провідника R і часу t , упродовж якого електричний струм протікав у провідникові.

Зазвичай теплота, що отримується електричним способом, обходиться набагато дорожче за теплоту, одержувану безпосереднім спалюванням вугілля або газу. Але в разі потреби отримання дуже високих температур, втрати тепла під час нагрівання вогнем можуть бути настільки значні, що електричне нагрівання може обходитися дешевше.

Деякі технологічні процеси, як, наприклад, електрозварювання, ефективніше відбуваються за допомогою електричної енергії. Основними способами електрозварювання є такі: дугове зварювання, електрошлакове, електронно-променеве, контактне, плазмове, індукційне (високочастотне зварювання).

Електродугове зварювання. Джерелом теплоти за дугового зварювання є зварювальна дуга – стійкий електричний розряд у дуже іонізованій суміші газів і парів матеріалів, які використовуються для зварювання, що характеризується високими густиною струму та температурою.

Дуговий розряд може збуджуватися: між зварюваним виробом та електродом із вмиканням виробу в коло зварювального струму (дуга прямої дії); між двома електродами без вмикання виробу в коло зварювального струму (дуга побічної дії); між двома електродами і виробом (комбінована дуга).

Розрізняють дугове зварювання плавким (металевим) електродом, за якого електрод дає додатковий (електродний) метал для заповнення шва, і неплавким електродом (вугільним, графітовим, вольфрамовим), за якого потрібен додатковий метал, що подається в зону дуги.

Приклад використання дуги прямої дії під час зварювання плавким електродом показано на рис. 2.2. Дуга горить між стрижнем електрода 1 та основним металом 2. Під дією теплоти дуги електрод і основний метал плавляться, утворюючи металеву зварювальну ванну 3. Краплі рідкого металу з електродного стрижня, що плавиться, переносяться у ванну через дуговий проміжок. Одночасно плавиться покриття 4 електрода, утворюючи газовий захист 5 навколо дуги та рідку шлакову ванну на поверхні розплавленого металу. Із рухом дуги метал зварювальної ванни твердне й утворюється зварний шов 6.

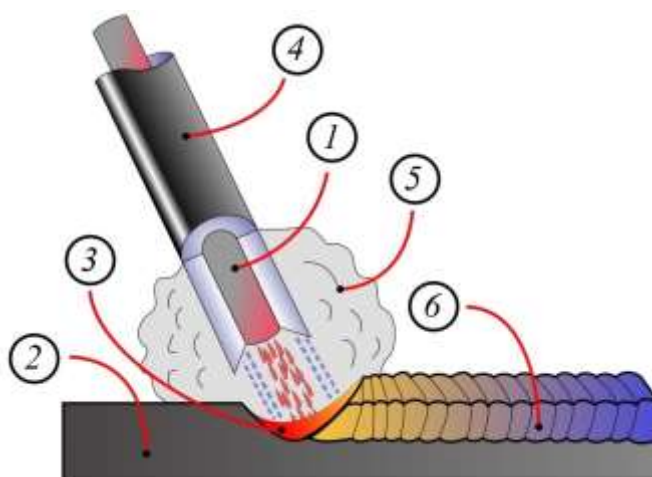


Рис. 2.2. Електродугове зварювання плавким електродом: 1 – електрод; 2 – заготовка; 3 – зварювальна ванна; 4 – електродне покриття; 5 – захисний газ; 6 – шов

Для живлення зварювальної дуги застосовують джерела змінного струму (зварювальні трансформатори) та джерела постійного струму – зварювальні генератори та зварювальні випрямлячі. Останні складаються зі зварювального трансформатора з регульовальним пристроєм і напівпровідникового випрямляча (рис. 2.3).

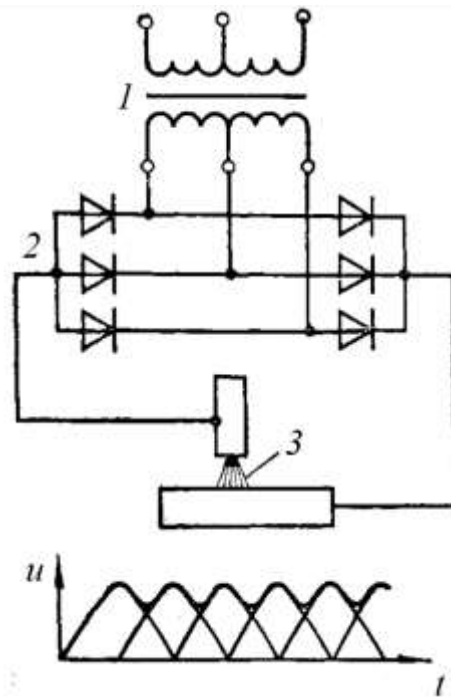


Рис. 2.3. Схема трифазного випрямляча: 1 – знижувальний трансформатор; 2 – напівпровідниковий випрямляч; 3 – зварювальна дуга

2.3. Системи освітлення постійного струму

Останніми роками умови виробництва та використання електричної енергії значно змінилися. Це пов'язано зі збільшенням децентралізації виробництва та зберігання енергії завдяки використанню фотоелектричних систем і батарей, а також із появою нових споживачів енергії постійного струму (електромобілі, освітлювальні прилади та ін.).

Мережі постійного струму забезпечують зниження втрат пов'язаних із перетіканням реактивної енергії та мають покращену керованість порівняно з мережами змінного струму. Системи освітлення постійного струму мають вищий ККД і не мають пульсації світлового потоку характерного для джерел світла змінного струму. Водночас такі системи мають недоліки, що пов'язані з невеликою надійністю напівпровідникових пристроїв живлення, порівняно високою вартістю, з гіршими умовами комутації та небезпекою виникнення електричної дуги.

Структурні схеми організації світлодіодної мережі освітлення за умови живлення від джерела змінного струму показані на рис. 2.4. Як видно з рисунка, у системі на рис. 2.4, *а* (з мережею змінного струму) втрати в провідниках з'єднувальних ліній становлять 3 % проти 1 % в мережі постійного струму (рис. 2.4, *б*). Зниження втрат із 5 % до 2 % у системі живлення мережі постійного струму пов'язано зі збільшенням потужності випрямляча та підвищенням його ККД. Загалом перехід на постійний струм дає змогу зменшити втрати на 5 %. Підвищення ефективності та спрощення мереж постійного струму може досягатися завдяки живленню від джерела постійного струму (сонячних батарей, акумуляторів). Це дає змогу виключити ланки інвертування та випрямлення напруги, зменшити втрати в мережі та її собівартість.

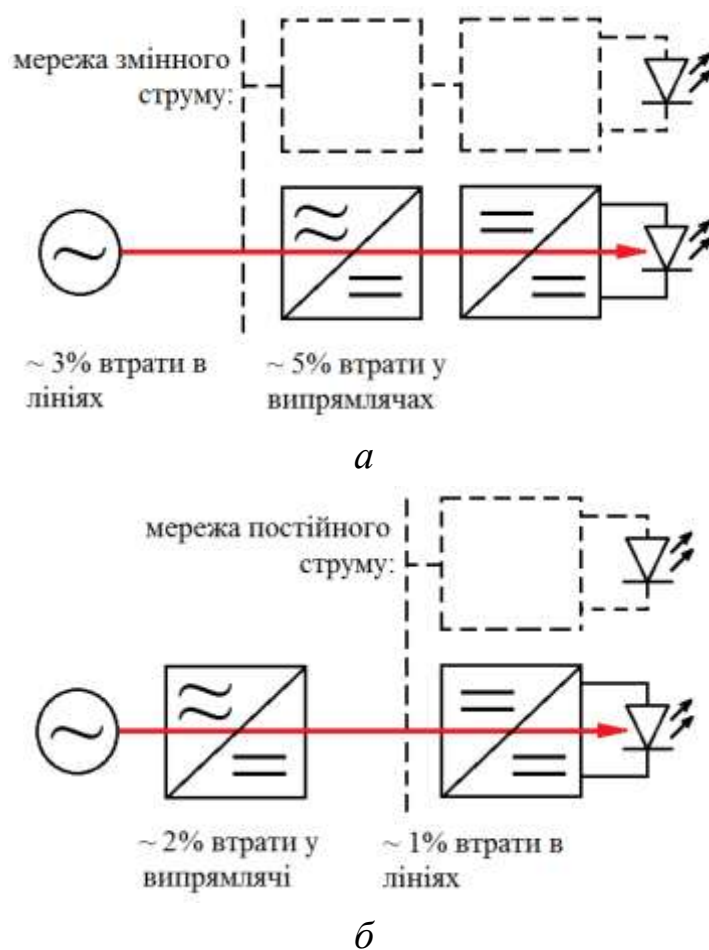


Рис. 2.4. Структурні схеми електроживлення світлодіодних мереж освітлення

Зазвичай у низьковольтних мережах постійного струму невеликої потужності використовують стандартний ряд напруги живлення приймачів: 12, 24, 36, 48 В і напругу розподільчої мережі 380 В.

2.3.1. Принцип роботи світлодіодів

Світлодіод – напівпровідниковий елемент із p - n -переходом, який випромінює світло під час проходження по ньому струму в прямому напрямку (від анода до катода).

Примітка. Діод має два виводи, які з'єднані з ділянками різних типів електричної провідності напівпровідника: електронною – n -типу та дірковою – p -типу.

Випромінювання виникає внаслідок рекомбінації електронів і дірок у області p - n -переходу. Світіння виникає не в усьому об'ємі напівпровідника, а тільки в зоні переходу. Світло поширюється в кристалі напівпровідника однаково в усіх напрямках, тому перехід сформований так, щоб вивести з нього світло з найменшими втратами (зазвичай поблизу поверхні грані кристала).

Змінюючи хімічний склад напівпровідника і легуючі домішки, можна створити світлодіоди, що випромінюють світло від ультрафіолетової до інфрачервоної зони спектра.

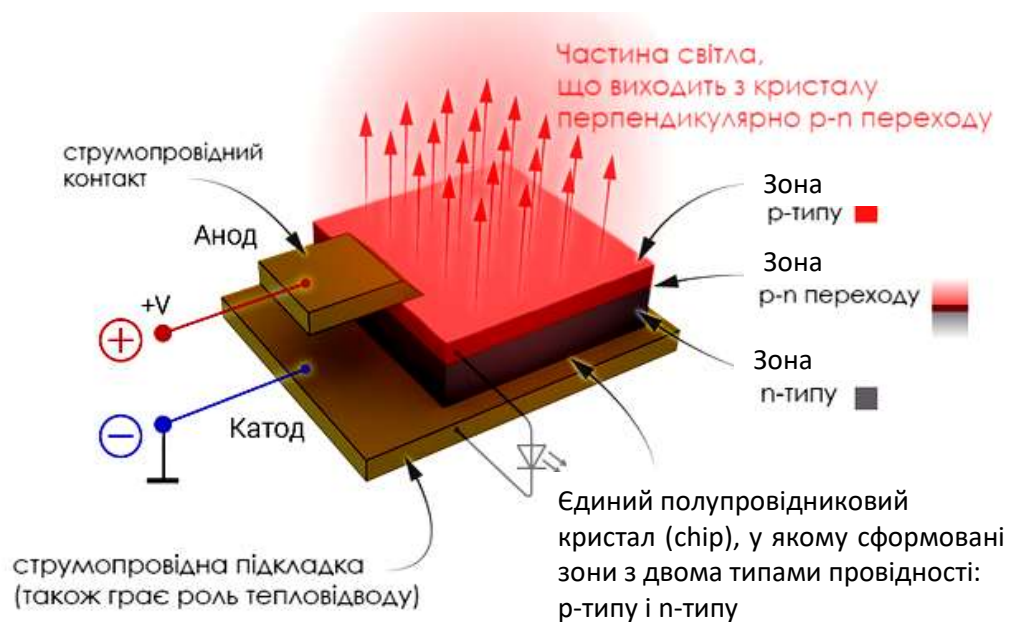


Рис. 2.5. Конструкція світлодіода

Найчастіше для світлодіодів використовуються напівпровідникові сполуки металів галію Ga й індію In (наприклад, арсенід галію GaAs, арсенід-фосфід галію GaAsP, алюмінію галію арсенід AlGaAs, нітрид галію GaN, фосфід індію InP).

Випромінювання у світлодіоді виникає в разі переходу між певними рівнями енергії напівпровідника в досить вузькому діапазоні. Ці рівні енергії визначаються хімічним складом і властивостями самого напівпровідника. Тому світло, що випромінюється світлодіодом, займає такий же вузький діапазон у спектрі. Інакше кажучи, світлодіод випромінює саме певний колір, на відміну від лампи розжарювання, яка випромінює всі кольори спектра одночасно. Наприклад «червоний» світлодіод випромінює у вузькій частині спектра, що відповідає червоному кольору.

Колір випромінювання світлодіода залежить від напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений його кристал, і деякою мірою – від температури *p-n* переходу.

Для відображення колірної температури джерел світла (зокрема, світлодіодних) використовується стандартна колірна температурна шкала. Вибір кольору залежить від призначення приміщення й матеріалу, що має бути освітлений.

Тепле світло сприяє більшому розслабленню м'язів ока. Тому саме тепле світло краще вибрати для житлових приміщень. Спектр випромінювання теплого світла подібний до природного світла сонця, а тому не завдає дискомфорту зоровому апарату навіть за умови тривалого перебування під ним. Крім того, він практично не спотворює звичний (у денний час) вигляд навколишніх предметів.

Холодне світло краще підходить для освітлення офісів і будь-яких інших місць, які вимагають концентрації уваги. Він, на противагу теплому світлу, сприяє підвищенню активності мозку і працездатності. Холодне світло робить кольори менш яскравими.

Світлодіоди мають невисоку (кілька вольт) зворотну напругу пробою, тому на них не можна подавати напругу зворотної полярності. У схемах, де можлива поява зворотної напруги,

світлодіод має бути захищений звичайним діодом, увімкненим паралельно з протилежною полярністю.

2.3.2. Будова LED-лампи

LED-лампа (LED – Light-emitting diode) складається з чотирьох основних частин (рис. 2.6): колби з розсіювачем – 1, плати зі світлодіодами – 2; драйвера – 3 та корпусу лампи із цоколем – 4.



Рис. 2.6. Будова LED лампи

«Драйвер» – це плата з електронними компонентами, що забезпечує живлення світлодіодів, перетворюючи змінний струм у постійний потрібного рівня напруги та вихідного струму. Стабілізація струму драйвера є обов’язковою умовою нормальної роботи світлодіода. Це відрізняє схемотехніку драйвера від звичайних джерел постійної напруги.

Для побудови драйверів сьогодні використовуються інтегральні мікросхеми, спеціально призначені для керування світлодіодами.

З підвищенням температури світловий потік світлодіодів завжди зменшується (рис. 2.7). Крім того, тривалий вплив високої температури призводить до незворотної втрати випромінювальних властивостей: зменшення інтенсивності та зміна спектра

випромінювання. Тому потужні світлодіоди встановлюють на основу, яка добре відводить тепло (алюмінієвий профіль, радіатори, тощо).

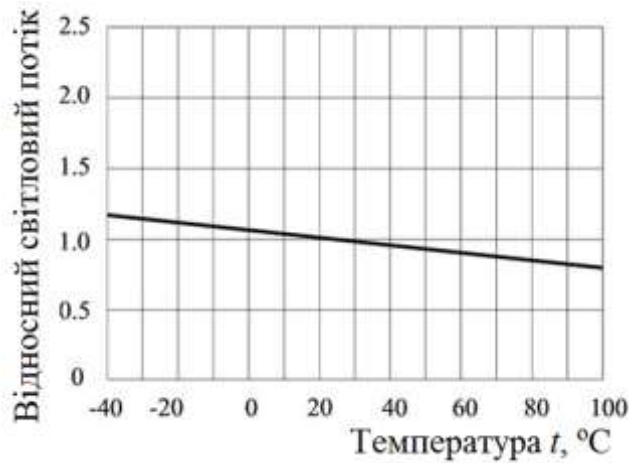


Рис. 2.7. Залежність світлового потоку від температури

Здебільшого світлодіодні світильники складаються з кількох світлодіодів, з'єднаних послідовно, паралельно або змішано. Паралельне з'єднання потребує застосування додаткових опорів, які дають змогу вирівняти струми в паралельних вітках. Різниця струмів зумовлена суттєвою відмінністю технологічних параметрів окремих діодів. У цьому разі окремі світлодіоди підключаються до джерела, як показано на рис. 2.8.

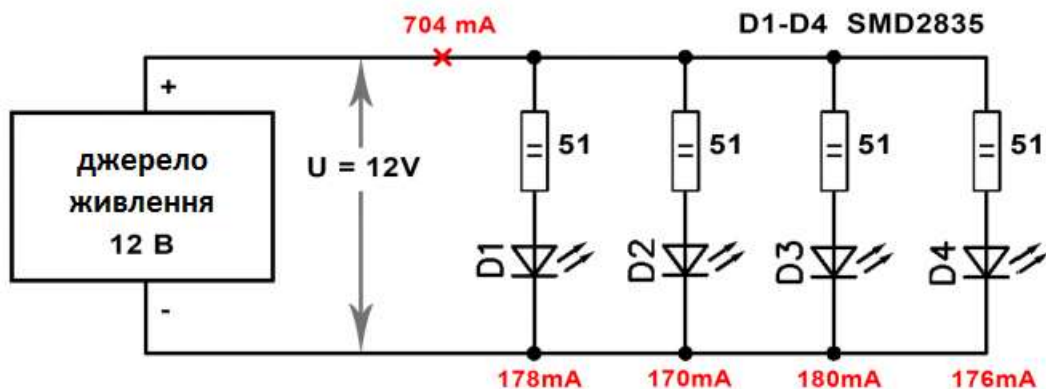


Рис. 2.8. Паралельне ввімкнення світлодіодів

Підвищення струму через світлодіод призводить до підвищення струму через резистор, на якому збільшується падіння

напруги. Це зумовлює зниження напруги на світлодіоді та струму, що протікає через нього.

Опір обмежувального резистора розраховується за законом Ома

$$R_{обм} = \frac{U_{дж} - U_{LED}}{I_{LED}},$$

де $U_{дж}$ – напруга джерела; U_{LED} – пряма напруга світлодіода; I_{LED} – робочий струм світлодіода.

Недоліком такого вмикання є застосування резисторів, на яких розсіюється потужність, зумовлюючи зниження ККД світильника.

Послідовне вмикання (рис. 2.9) автоматично забезпечує рівність струмів діодів, а також спрощує його стабілізацію.

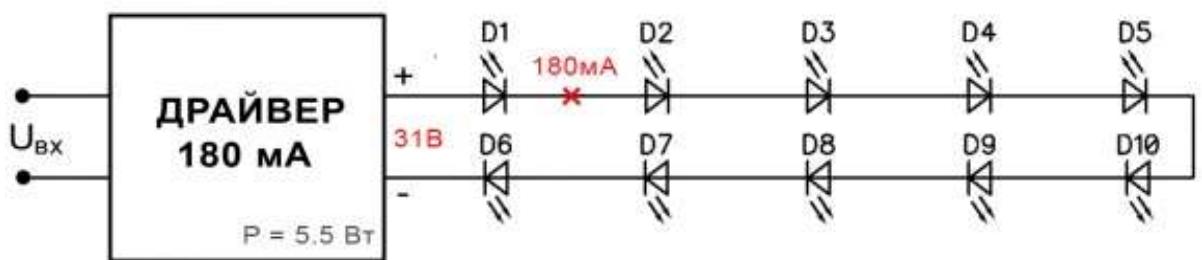


Рис. 2.9. Послідовне ввімкнення світлодіодів

Також застосовуються комбіновані світлодіодні модулі з паралельно-послідовним з'єднанням.

Запитання для самоперевірки

1. Поясніть фізичні процеси, що відбуваються під час електролізу.
2. У яких технологічних процесах застосовується електроліз?
3. Поясніть закон Джоуля – Ленца.
4. Наведіть приклади застосування теплової дії струму.
5. Наведіть структурні схеми систем освітлення постійного струму.
6. Поясніть принцип роботи світлодіода.
7. Як регулюється рівень світлового потоку світлодіода?

Лекція 3. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Електричний струм, що змінюється із часом, називають змінним. У колах *синусоїдного струму* електричні величини (ЕРС, напруги, струми) змінюються за гармонічним (синусоїдним) законом.

Змінний струм має широке застосування, оскільки він легко трансформується і може передаватися на великі відстані, за високої напруги, з малими втратами. Крім того, електричні машини й інші електротехнічні пристрої змінного струму порівняно прості та надійні в експлуатації.

Синусоїдний струм дає змогу найбільш економічно здійснювати виробництво, передачу, розподіл і використання електричної енергії, оскільки форми кривих напруг і струмів на всіх ділянках складного лінійного електричного кола залишаються незмінними.

В Україні, як і в більшості країн світу, виробництво й передачу електричної енергії здійснюють за допомогою трифазного синусоїдного струму із частотою 50 Гц. У деяких галузях техніки використовують й інші значення частоти залежно від технічних потреб. В авіації, наприклад, застосовують синусоїдний струм частотою 400 Гц, тому що за такої частоти знижуються габаритні розміри й вага авіаційного електрообладнання. В електротермічних установках використовують діапазон частот 500 Гц – 50 МГц. Частоти від кількох сотень мегагерц до мільярда герц застосовують у радіотехніці.

3.1. Отримання синусоїдної ЕРС

Для пояснення принципу отримання синусоїдної ЕРС розглянемо найпростішу конструкцію генератора, у якій один виток

у вигляді рамки обертається в магнітному полі між двома постійними магнітами 1 із полюсами N і S (рис. 3.1, *a*).

Обмотка ротора 2 представлена двома елементарними провідниками 3, кінці яких приєднуються до двох ізолюваних від вала контактних кілець 4. По поверхні кілець ковзають нерухомі щітки 5, за допомогою яких обмотка приєднується до зовнішнього кола.

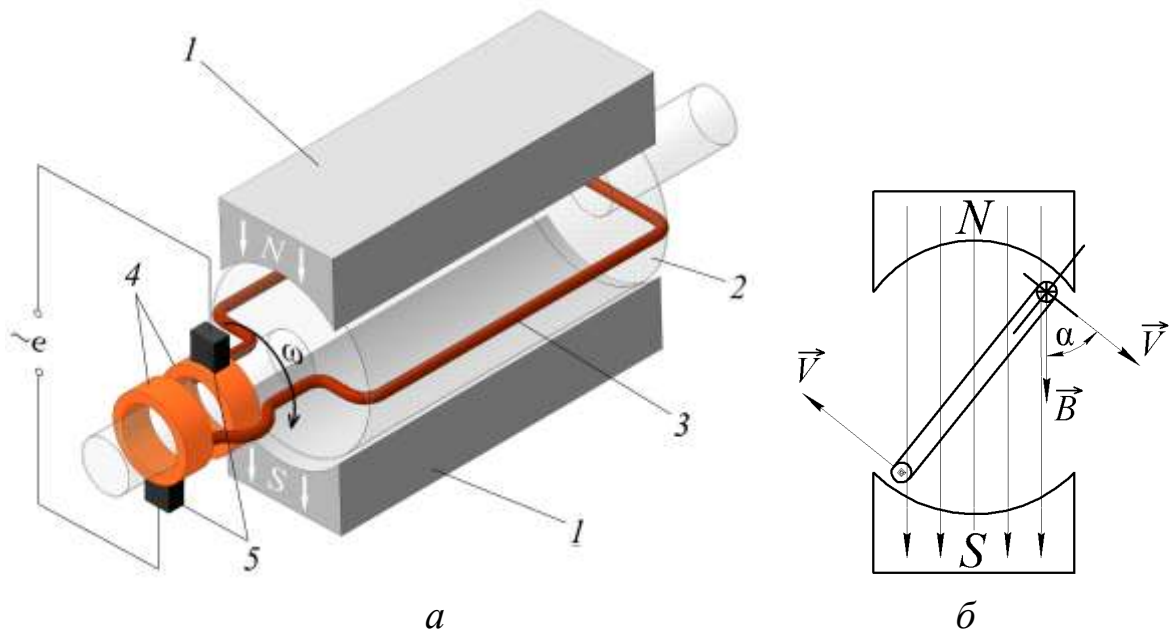


Рис. 3.1. Отримання синусоїдної ЕРС

Якщо за допомогою приводного двигуна обертати ротор, наприклад, за годинниковою стрілкою, то в обох провідниках його обмотки будуть індукуватись ЕРС, напрямки яких визначається за правилом правої руки. Значення ЕРС, згідно із законом електромагнітної індукції, за умови однорідного розподілу магнітного поля в зоні обертання рамки визначиться виразом

$$e = 2Bvl \sin \alpha,$$

де множник 2 враховує кількість провідників з довжиною l ; α – кут між векторами лінійної швидкості провідника V та магнітної індукції B (рис. 3.1, *б*).

Унаслідок того, що провідники по чергово проходять під північним і південним полюсом, кут α змінюється за законом ωt . Тому ЕРС обмотки буде змінюватися за синусоїдним законом

$$e = 2B\omega l \sin \omega t = E_m \sin \omega t ,$$

де E_m – амплітуда ЕРС.

Частота індукованої ЕРС дорівнюватиме частоті обертання рамки. Через контактні кільця 4, які обертаються разом із ротором, ЕРС передається на затискачі генератора.

Якщо до обмотки приєднати навантаження, то в ній почне протікати струм, а в навантаженні встановиться синусоїдна напруга, тобто генератор працюватиме як джерело електричної енергії.

3.2. Елементи схем заміщення кіл змінного струму

3.2.1. Резистивний елемент

Резистивний елемент є пасивним елементом схеми заміщення. Параметром резистивного елемента є його активний опір R , що характеризує втрати енергії, яка виділяється в ньому. Потрібно мати на увазі, що активний опір металевих провідників змінному струму більше, ніж опір постійному. Це пояснюється тим, що густина змінного струму розподіляється нерівномірно в перетині провідника через дію поверхневого ефекту (витіснення струму до поверхні провідника), унаслідок чого втрати енергії на нагрівання зростають. Опір провідника, який характеризує ці втрати, збільшується.

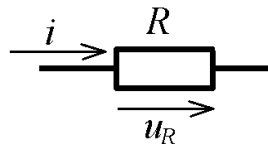


Рис. 3.2. Резистивний елемент

Резистивним елементом у схемах заміщення враховують також наявність втрат енергії в магнітних осердях котушок, що ввімкнені до кола змінного струму.

Напруга u_R і струм i резистивного елемента пов'язані законом Ома (для миттєвих значень):

$$u_R = iR. \quad (3.1)$$

Як впливає з рівняння (3.1), напруга резистивного елемента буде пропорційною до струму, який по ньому протікає, та матиме однакову з ним фазу. Тобто якщо миттєве значення струму записати в аналітичній формі у вигляді

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (3.2)$$

то згідно з (3.1) миттєве значення напруги становитиме

$$u_R = RI_m \sin(\omega t + \psi_i) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

де U_m, I_m – амплітудні значення відповідно напруги та струму; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота зміни струму (рад/с); $f = 1/T$ – частота (Гц); T – період зміни струму (с); ψ_i, ψ_u – початкові фази відповідно струму та напруги (рад). Причому в цьому разі $\psi_i = \psi_u$.

У колах змінного і, зокрема, синусоїдного струму під час розрахунків, вимірювань та аналізу використовують діючі значення відповідних електричних величин.

Діючим значенням змінного періодичного струму називається умовне значення постійного струму, який утворює такий самий тепловий ефект, як і змінний струм за той самий час, що дорівнює періоду його повторення.

Математично це середньоквадратичне значення струму за його період, тобто

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt},$$

або для синусоїдного струму

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.3)$$

Аналогічно визначаються діючі значення й інших величин, зокрема для напруги та ЕРС відповідно:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Тоді закон Ома (3.1) для резистивного елемента запишеться через діючі значення напруги та струму

$$U_R = IR. \quad (3.4)$$

3.2.2. Індуктивний елемент

Індуктивний елемент схеми заміщення електричного кола зі змінним струмом характеризує наявність змінного магнітного поля, створеного цим струмом.

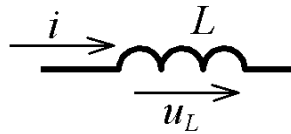


Рис. 3.3. Індуктивний елемент

В електричних колах постійного струму магнітне поле, створене струмом, не змінюється і не впливає на режим роботи кола. У колах зі змінним струмом будь-яка зміна струму i в індуктивному елементі кола, відповідно до закону електромагнітної індукції, супроводжується утворенням ЕРС у цьому елементі. Це явище називають самоіндукцією, а наведені ЕРС – ЕРС самоіндукції.

Закон електромагнітної індукції (закон Фарадея) формулюють у такий спосіб: значення ЕРС e , яка індукується в провідному контурі, дорівнює швидкості зміни магнітного потоку Φ , що пронизує цей контур

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.5)$$

де знак мінус, відповідно до закону Ленца, показує, що індукований струм завжди прагне протидіяти зміні магнітного потоку контуру.

За законом електромагнітної індукції, ЕРС самоіндукції індуктивного елемента визначається швидкістю зміни власного потокозчеплення:

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi_L}{dt}, \quad (3.6)$$

де w – кількість витків; $\Psi_L = Li$ – власне потокозчеплення; L – індуктивність.

Із (3.6) видно, що індуктивність L можна розглядати як коефіцієнт пропорційності між потокозчепленням Ψ_L і струмом елемента або як коефіцієнт пропорційності між швидкістю зміни струму і ЕРС самоіндукції, наведеної в цьому елементі

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt} = -L \frac{di}{dt}.$$

Ця ЕРС утворює напругу на індуктивному елементі, яка дорівнює

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}. \quad (3.7)$$

Основна одиниця виміру потокозчеплення й магнітного потоку в системі СІ – вебер (Вб), $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$. Одиниця індуктивності – генрі (Гн), $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ В} \cdot \text{А/с}$.

Якщо у вираз (3.7) підставити миттєве значення струму згідно з (3.2), отримаємо

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.8)$$

звідки видно, що амплітуда напруги становитиме $U_m = \omega L I_m$.

Добуток $\omega L = 2\pi f L = X_L$ називають індуктивним опором X_L і вимірюють у омах (Ом). Тоді закон Ома для індуктивного елемента визначиться виразом

$$U_L = I X_L. \quad (3.9)$$

Із виразу (3.8) випливає, що початкова фаза напруги на індуктивному елементі становитиме

$$\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2},$$

тобто напруга індуктивного елемента випереджає струм на чверть періоду ($\pi/2$). Відповідні часові діаграми показані на рис. 3.4.

Під час порівняння напруги та струму за часом використовують різницю часових фаз – *фазовий зсув*:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

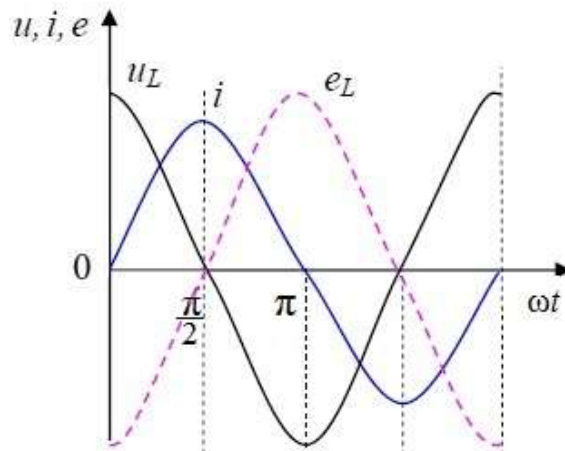


Рис. 3.4. Часові діаграми

Тоді значення кута фазового зсуву для індуктивного елемента становитиме

$$\varphi_L = \psi_i + \frac{\pi}{2} - \psi_i = \frac{\pi}{2}. \quad (3.10)$$

3.2.3. Ємнісний елемент

Ідеальний ємнісний елемент відображає здатність реального елемента електричного кола накопичувати електричний заряд і створювати в оточуючому просторі електричне поле. Реальний елемент електричних кіл – конденсатор, хоча накопичувати заряди можуть й інші елементи.

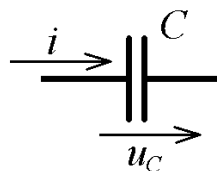


Рис. 3.5. Ємнісний елемент

Якщо між виводами конденсатора прикладена змінна напруга u_C , то на його обкладках накопичується заряд

$$q = C u_C, \quad (3.11)$$

де коефіцієнт пропорційності C називають ємністю конденсатора. Вимірюється ємність у фарадах (Ф).

Напруга та струм ємнісного елемента пов'язані виразом

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}. \quad (3.12)$$

Якщо напруга u_C зростає (рис. 3.6), то струм позитивний ($i > 0$). Це означає, що в цей час струм має напрямок, який збігається з умовним позитивним напрямком напруги. Заряд і енергія електричного поля $W_e = C \frac{u_C^2}{2} = q \frac{u_C}{2}$ при цьому зростають. Енергія надходить від джерела й накопичується в електричному полі.

Коли напруга u_C зменшується, зменшується і заряд, а енергія поля повертається назад до джерела. Отже, у колі з ємнісним елементом відбувається обмін енергією між джерелом і електричним полем.

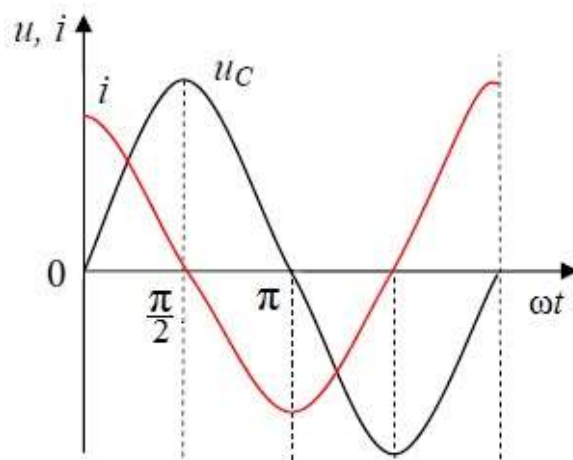


Рис. 3.6. Часові діаграми

З виразу (3.12) напруга ємнісного елемента дорівнює

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt.$$

Якщо в цей вираз підставити струм згідно з (3.2), отримаємо

$$u_C = \frac{1}{C} \int I_m \sin(\omega t + \psi_i) = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \psi_i) = \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.13)$$

звідки видно, що амплітуда напруги становитиме

$$U_m = \frac{1}{\omega C} I_m.$$

Вираз $1/\omega C = 1/2\pi fC = X_C$ називають ємнісним опором X_C і вимірюють у омах (Ом). Тоді закон Ома для ємнісного елемента визначиться виразом

$$U_C = IX_C. \quad (3.14)$$

Із виразу (3.14) випливає, що початкова фаза напруги на ємнісному елементі становитиме

$$\psi_u = \psi_i - \frac{\pi}{2},$$

тобто напруга ємнісного елемента відстає від струму на чверть періоду $\pi/2$ (рис. 3.6).

Тоді значення кута фазового зсуву для ємнісного елемента становитиме

$$\varphi_C = \psi_i - \frac{\pi}{2} - \psi_i = -\frac{\pi}{2}. \quad (3.15)$$

3.3. Векторні діаграми

Відомо, що синусоїдні величини можна зобразити векторами, які обертаються з кутовою швидкістю ω проти годинникової стрілки. Довжини векторів відповідають амплітудам відповідних величин згідно з прийнятим масштабом.

Для електротехнічних величин побудову векторів зазвичай виконують для діючих значень. При цьому зручно розташовувати вектори для моменту часу $t = 0$. У цьому разі вектори займають кутове положення стосовно горизонтальної осі, що визначається початковою фазою відповідної величини.

Сукупність векторів, зображених у спільній координатній системі, називають *векторною діаграмою*.

Для векторів справедливі закони Кірхгофа, які в такому разі набудуть вигляду:

перший закон

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0; \quad (3.16)$$

другий закон

$$\sum_{k=1}^m \underline{U}_k = \sum_{k=1}^n \underline{E}_k. \quad (3.17)$$

Усі правила складання розрахункових рівнянь і врахування знаків зберігаються, тільки тепер йдеться про геометричну суму векторів. Тобто в рівняння (3.16, 3.17) *в жодному разі* не можна підставляти діючі значення відповідних величин, адже всі вони мають у загальному випадку різні фази!

Відповідно до аналізу, викладеного в п. 3.2.1–3.2.3, можна побудувати векторні діаграми для базових елементів схем заміщення.

Напруга та струм резистивного елемента збігаються за фазою, тому кут зсуву фаз дорівнює нулю (рис. 3.7, а).

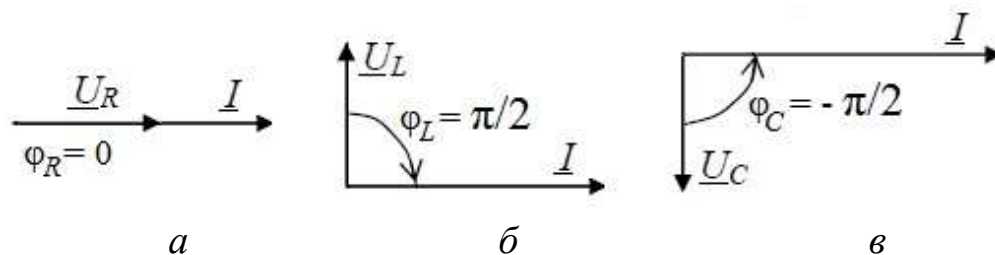


Рис. 3.7. Векторні діаграми

Напруга індуктивного елемента (рис. 3.7, б) випереджає струм на 90° , тоді як напруга ємнісного, навпаки, відстає від струму на 90° (рис. 3.7, в).

Векторні діаграми часто застосовуються під час розрахунку й аналізу режимів роботи кіл синусоїдального струму. Їх використання робить розрахунок більш наочним і простим. Це спрощення полягає в тому, що додавання і віднімання миттєвих значень відповідних величин можна замінити додаванням і відніманням їхніх векторів.

Запитання для самоперевірки

1. Що розуміють під змінним струмом?
2. Дайте характеристику резистивного (індуктивного, ємнісного) елементів електричного кола.
3. Що розуміють під індуктивністю?
4. У чому різниця фізичних процесів у індуктивному елементі в разі проходження через нього постійного і змінного струму?
5. Що розуміють під ємністю?
6. У чому відмінність фізичних процесів у ємнісному елементі в разі його роботи в колах постійного і змінного струму?
7. Що розуміють під діючим значенням періодичного струму, напруги?
8. Що розуміють під середнім значенням періодичного синусоїдного струму?
9. Поясніть параметри синусоїдного струму, напруги.
10. Що розуміють під векторною діаграмою? У чому її перевага під час аналізу електричних кіл?
11. Запишіть закони Кірхгофа у векторній формі й поясніть їх.

Лекція 4. ОДНОФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

4.1. Послідовне з'єднання резистивного, індуктивного та ємнісного елементів

Відповідно до другого закону Кірхгофа, загальна напруга кола (рис. 4.1, а) дорівнює векторній сумі напруг на кожному елементі, тобто

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C. \quad (4.1)$$

Для побудови векторної діаграми вважатимемо, що початкова фаза струму дорівнює нулю $\psi_i = 0$. Оскільки за послідовного з'єднання спільним для всіх елементів є струм, то зручно починати побудову саме із цього вектора, а інші вектори відкладати відносно нього.

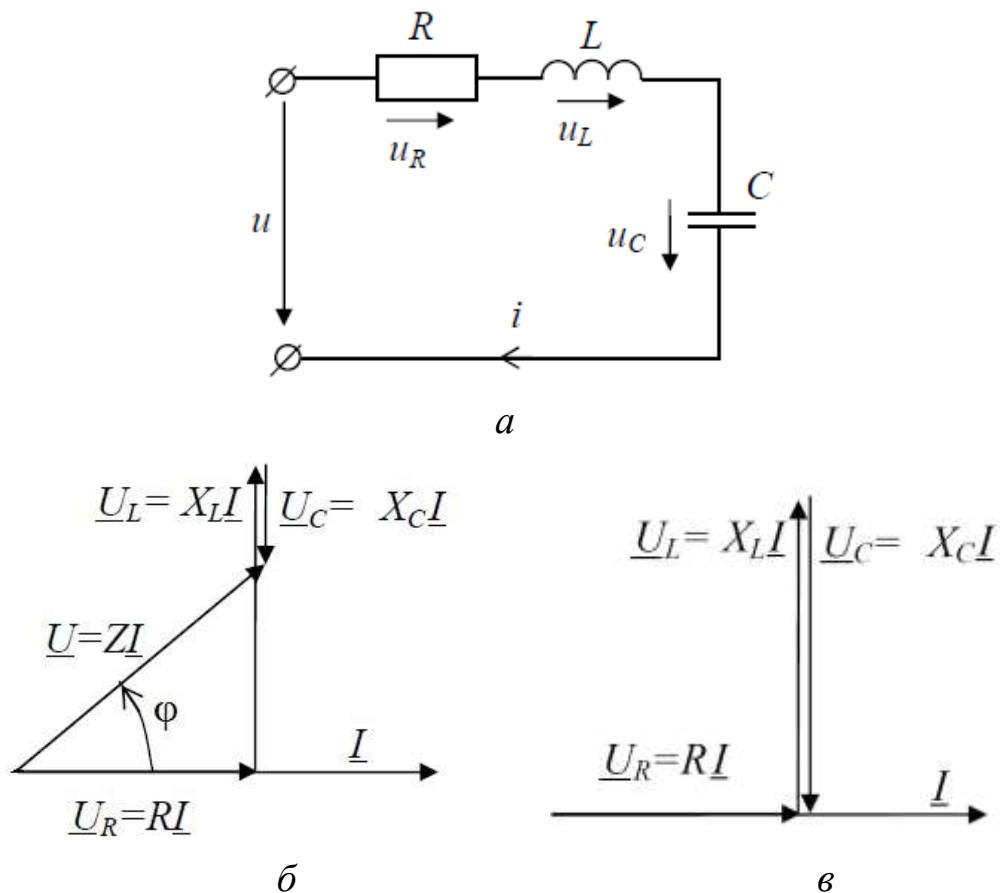


Рис. 4.1. Послідовне з'єднання елементів R , L , C

Вектор напруги на резистивному елементі $\underline{U}_R$ спрямований у тому самому напрямку, що й вектор струму (рис. 4.1, б). Вектор напруги індуктивного елемента $\underline{U}_L$ випереджає вектор струму $\underline{I}$ на кут $\pi/2$ (90°). Вектор напруги ємнісного елемента $\underline{U}_C$ відстає від вектора струму на кут $\pi/2$. На рис. 4.1, б зображено випадок, коли $U_L > U_C$, а кут зсуву фаз між загальною напругою та струмом φ – додатний.

Із векторної діаграми випливає, що

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Якщо підставити у цей вираз відповідні закони Ома (3.4, 3.9, 3.14), отримаємо

$$U = \sqrt{R^2 I^2 + (X_L I - X_C I)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Останній вираз у формі

$$U = IZ \quad (4.2)$$

є законом Ома для ділянки з послідовним з'єднанням елементів R , L , C . Тут $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – повний опір кола (вимірюється в Ом).

Кут зсуву фаз між загальною напругою та струмом φ можна визначити з трикутника напруг зі сторонами U , U_R , $U_L - U_C$ (рис. 4.1, б)

$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R},$$

або з подібного до нього трикутника опорів

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (4.3)$$

Залежно від співвідношення між індуктивним і ємнісним опорами розглянутого кола його загальний реактивний опір $X = X_L - X_C$ може бути індуктивним (якщо $X_L > X_C$) або ємнісним (якщо $X_L < X_C$). У разі коли реактивні складники будуть однакові (тобто коли $X_L = X_C$), повний опір кола матиме суто активний характер.

В останньому випадку, як випливає з (4.3), загальна напруга кола збігається за фазою з його струмом. Це явище в послідовному колі з елементами R , L і C називають *резонансом напруг*.

Резонанс напруг виникає, коли реактивний опір кола дорівнює нулю ($X = 0$), тобто коли індуктивний опір дорівнює ємнісному опору ($X_L = X_C$). У цьому разі індуктивна і ємнісна напруги компенсують одна одну $\underline{U}_L + \underline{U}_C = 0$, оскільки вони рівні за значенням і протилежні за фазою (рис. 4.1, в).

З умови $X_L = X_C$, тобто $\omega L = 1/\omega C$, випливає, що резонансу можна досягти, змінюючи частоту напруги джерела або змінюючи параметри кола – індуктивність чи ємність. Кутова частота, за якої настає резонанс, називається *резонансною кутовою частотою*

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Наслідки резонансу напруг:

оскільки реактивні опори рівні між собою, то повний опір кола буде мінімальний і дорівнюватиме

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R,$$

Отже, загальний струм електричного кола буде максимальний

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R};$$

рівність реактивних опорів зумовлює рівність діючих значень реактивних напруг

$$U_L = U_C,$$

а отже, $U = U_R$.

Відношення напруги на індуктивності чи ємності до напруги, прикладеної до кола в разі резонансу, називають *добротністю контуру*

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}.$$

У коливальних контурах із високою добротністю під час резонансу відбувається значне підсилення напруги. Тому в тих випадках, коли резонансний режим непередбачений, його поява

може викликати пробій ізоляції та небезпеку ураження електричним струмом.

4.2. Коло змінного струму з паралельно з'єднаними приймачами

Відповідно до першого закону Кірхгофа, виразимо загальний струм через векторну суму струмів в окремих вітках, тобто

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C. \quad (4.4)$$

Оскільки за паралельного з'єднання спільною для всіх елементів є напруга, то векторну діаграму зручно будувати, починаючи з вектора напруги, умовно вважаючи її початкову фазу рівною нулю $\psi_u = 0$ (рис. 4.2, б).

Вектор струму індуктивного елемента $\underline{I}_L$ відстає від вектора напруги $\underline{U}$ на кут $\pi/2$ (90°). Вектор струму резистивного елемента $\underline{I}_R$ збігається за напрямком із вектором напруги. Вектор струму вітки, що містить ємнісний елемент $\underline{I}_C$, випереджає вектор напруги на кут $\pi/2$. Сума цих векторів становить вектор загального струму кола $\underline{I}$, який відстає від вектора прикладеної напруги $\underline{U}$ на кут φ . На рис. 4.2, б зображено випадок, коли $\underline{I}_L > \underline{I}_C$ і кут φ – додатний, а на рис. 4.2, в випадок, коли $\underline{I}_L = \underline{I}_C$, а кут $\varphi = 0$.

Із векторної діаграми, показаної на рис. 4.2, б випливає, що

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}. \quad (4.5)$$

Виразимо струми у вітках через напругу кола відповідно до законів Ома для окремих елементів (3.4, 3.9, 3.14):

$$I_R = \frac{U}{R} = UG; \quad I_L = \frac{U}{X_L} = UB_L; \quad I_C = \frac{U}{X_C} = UB_C,$$

де $G = 1/R$ – активна провідність резистивного елемента;

$B_L = 1/X_L$ – реактивна провідність індуктивного елемента;

$B_C = 1/X_C$ – реактивна провідність ємнісного елемента.

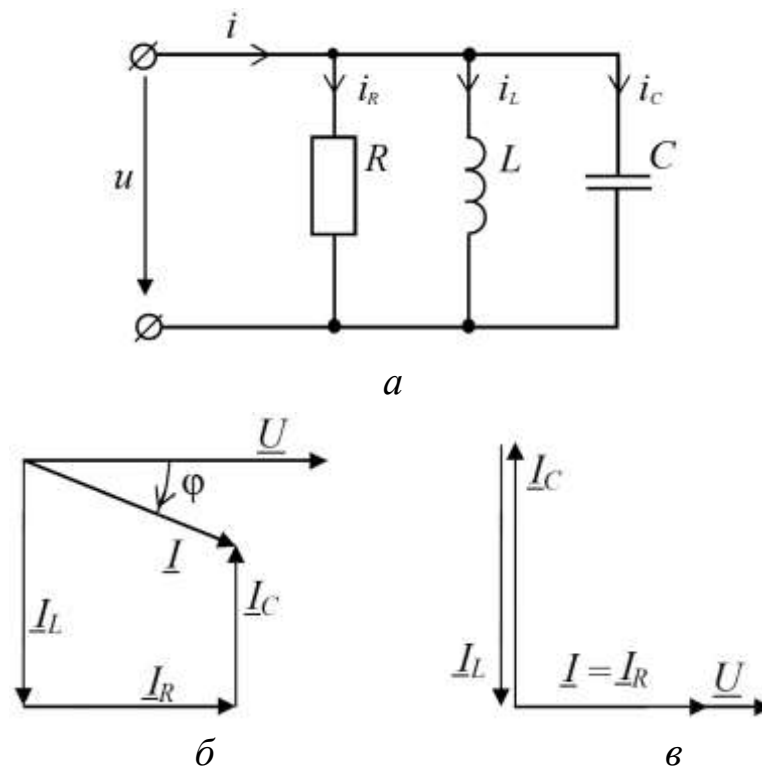


Рис. 4.2. Паралельне з'єднання елементів R, L, C

Підставивши відповідні вирази у (4.5), отримаємо

$$I = \sqrt{U^2 G^2 + (UB_L - UB_C)^2} = U \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}.$$

Останній вираз у формі

$$I = UY \quad (4.6)$$

є законом Ома для ділянки з паралельним з'єднанням елементів R, L, C . Тут $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$ – повна провідність ділянки кола (вимірюється в См).

Кут зсуву фаз між напругою та загальним струмом φ можна визначити з трикутника струмів зі сторонами $I, I_R, I_L - I_C$ (рис. 4.2, б)

$$\varphi = \arctg \frac{I_L - I_C}{I_R}$$

або з подібного до нього трикутника провідностей

$$\varphi = \arctg \frac{B}{G}, \quad (4.7)$$

де $B = B_L - B_C$ – реактивна провідність кола, См.

У паралельному колі з індуктивними і ємнісними елементами можливе явище, коли загальний струм кола (струм нерозгалуженої

ділянки) і напруга на вході кола збігаються за фазою. Це явище називають *резонансом струмів*.

Умовою виникнення резонансу струмів є рівність нулю вхідної реактивної провідності кола $B = B_L - B_C = 0$, тобто індуктивна провідність B_L має дорівнювати ємнісній провідності B_C .

Існує два способи досягнення резонансу в такому електричному колі – частотний і параметричний. Оскільки реактивні провідності обох віток залежать від частоти, причому зі зростанням частоти індуктивна провідність зменшується, а ємнісна збільшується, то, змінюючи частоту джерела, можна досягти рівності реактивних провідностей обох віток і такий резонанс називається *частотним*. Інакше можна отримати резонанс підбираючи параметри L і C за заданої частоти. У такому разі говорять про *параметричний резонанс*.

Наслідки резонансу струмів:

оскільки реактивні провідності рівні між собою, то повна провідність кола дорівнює активній провідності

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = G,$$

Отже, загальний струм електричного кола буде мінімальний

$$I = UY = UG;$$

реактивні складові струмів обох віток будуть рівними

$$I_L = UB_L = I_C = UB_C;$$

енергія магнітного поля індуктивного елемента буде повністю переходити в енергію електричного поля ємнісного і навпаки, а джерело живлення тільки компенсує втрату енергії в активному опорі.

Явище резонансу струмів практично використовується для штучного підвищення коефіцієнта потужності в електричних мережах, електроустановках тощо. Енергія, що споживається приймачами й перетворюється в інші види енергії (механічну, теплову тощо), пропорційна активній потужності. Оскільки сучасне енергетичне обладнання має переважно активно-індуктивний характер опору, то для підвищення коефіцієнта потужності

паралельно до електричної установки підключають ємнісний елемент, зменшуючи таким чином загальний струм, а отже, і втрати у з'єднувальних лініях, обмотках джерел електроенергії тощо.

Запитання для самоперевірки

1. Напишіть вираз для миттєвого значення струму в колі, що складається з послідовно з'єднаних елементів R і L , якщо до затискачів кола прикладена напруга $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$.

2. Напишіть вираз для миттєвого значення струму в колі, що складається з послідовно з'єднаних елементів R і C , якщо до затискачів кола прикладена напруга $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$.

3. Напишіть вираз для миттєвого значення напруги на затискачах кола, що складається з котушки з активним опором R і індуктивністю L , якщо миттєве значення струму $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Накресліть векторну діаграму для цього кола.

4. Котушка з параметрами R і L увімкнена паралельно з конденсатором з ємністю C . Напруга на затискачах кола $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$. Напишіть вираз для миттєвого значення струму в нерозгалуженій частині кола.

5. Які кути зсуву фаз між напругами елементів R , L і C , увімкнених послідовно?

6. Які кути зсуву фаз між струмами елементів R , L і C , увімкнених паралельно?

7. Визначте умови резонансу напруг у колі, накресліть для цього режиму векторну діаграму.

8. Доведіть, що в колі змінного струму з послідовним увімкненням декількох елементів можливі умови, за яких напруга на будь-якому з елементів перевищуватиме напругу на вході кола.

9. Доведіть, що в колі змінного струму з паралельним увімкненням декількох елементів можливі умови, за яких струм у будь-якій вітці перевищуватиме струм нерозгалуженої ділянки.

10. Напишіть умову виникнення резонансу струмів, виражену через опори паралельних віток.

Лекція 5. ПОТУЖНІСТЬ КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

5.1. Потужність резистивного елемента

Залежності миттєвих значень напруги, струму й потужності в резисторі показані на рис. 5.1. Графіки стосуються випадку, коли початкова фаза напруги, а отже, і струму дорівнюють нулю.

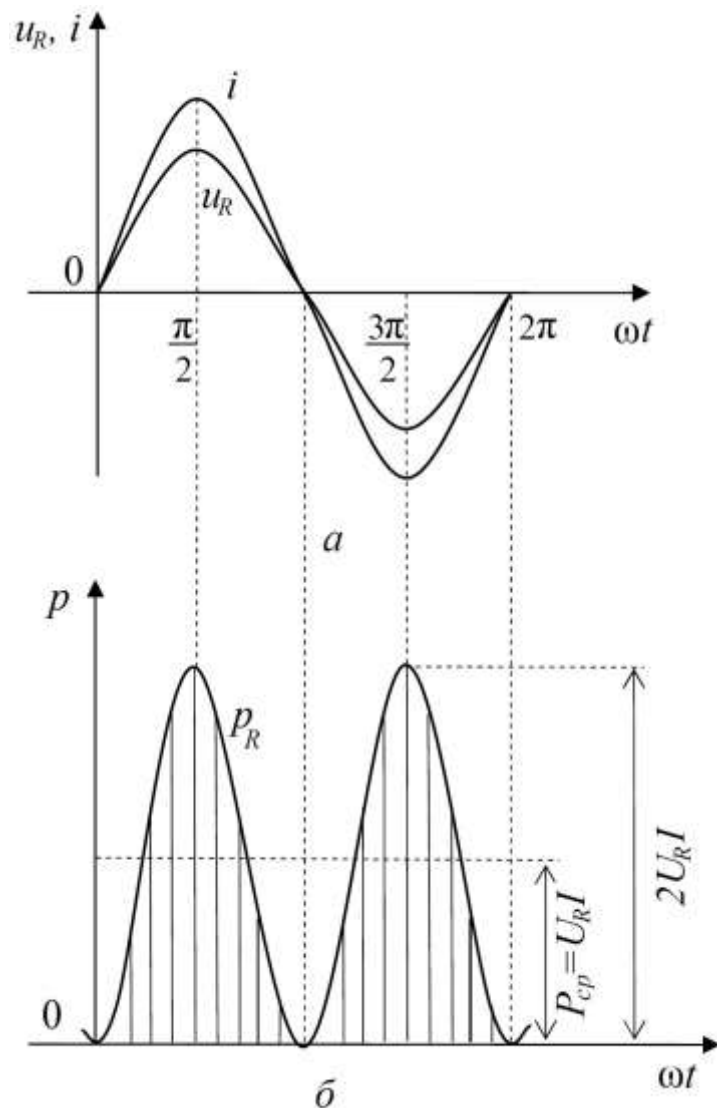


Рис. 5.1. Потужність резистивного елемента

Миттєва потужність резистивного елемента визначається формулою

$$p_R = u_R i = Ri^2.$$

Потужність не залежить від знака струму і завжди позитивна (рис. 5.1, б), тобто в резистивному елементі незалежно від напрямку струму енергія завжди надходить від джерела й перетворюється в ньому на теплову енергію.

Потужність резистивного елемента характеризуються середнім значенням, яке дорівнює

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U_R I = I^2 R. \quad (5.1)$$

Середнє значення миттєвої потужності в колах змінного струму виражає *активну потужність*, яка вимірюється у ватах (Вт).

5.2. Потужність індуктивного елемента

Миттєве значення потужності в колі з індуктивним елементом дорівнює

$$p_L = u_L i = U_L I \sin(2\omega t + 2\psi_i). \quad (5.2)$$

Графік зміни цієї потужності в часі для випадку $\psi_i = 0$ наведено на рис. 5.2, б.

У першу чверть періоду, коли струм і напруга додатні, потужність також додатна. Енергія від джерела надходить у коло і накопичується в магнітному полі індуктивності $W_L = Li^2/2$. До кінця першої чверті періоду поле має максимальну енергію, яка пропорційна заштрихованій площі, обмеженій віссю абсцис і першою півхвилею синусоїди потужності.

У другу чверть періоду струм і убуває, але залишається додатним. Напруга u_L і потужність p_L від'ємні. Енергія магнітного поля повертається назад до джерела. Тому середнє за період значення потужності кола з ідеальним індуктивним елементом дорівнює нулю:

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T p_L dt = 0.$$

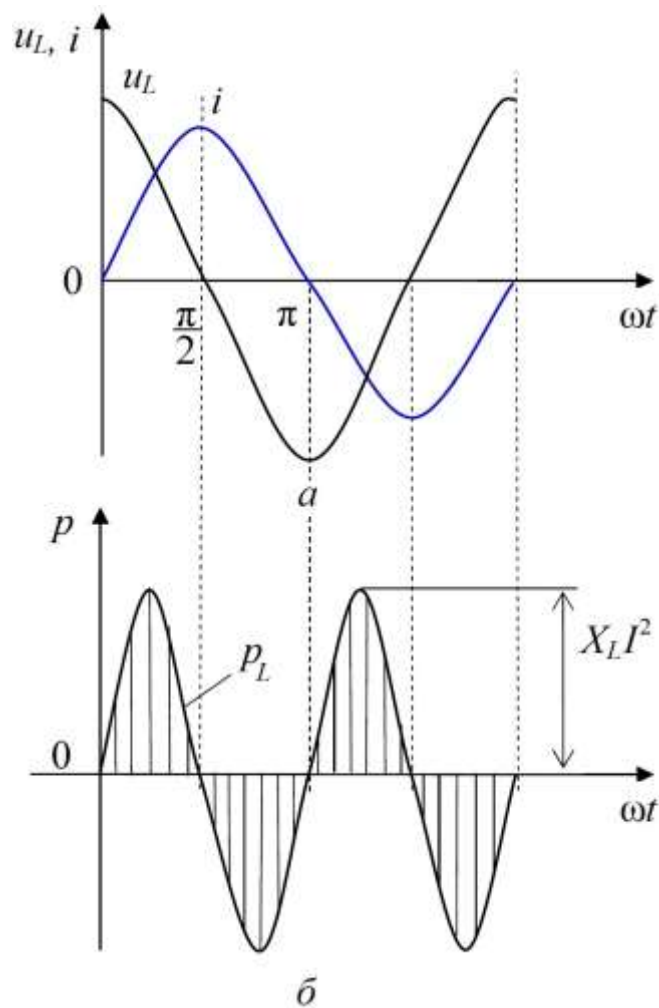


Рис. 5.2. Потужність індуктивного елемента

Отже, у колі відбувається безперервний обмін енергією між джерелом і магнітним полем індуктивності без витрати енергії джерела.

За аналогією з активною потужністю в колі з ідеальним резистором, у колі з ідеальним індуктивним елементом вводиться поняття *реактивної індуктивної потужності*:

$$Q_L = U_L I = I^2 X_L, \quad (5.3)$$

що визначається, як амплітудне значення миттєвої потужності (рис. 5.2, б).

Реактивна потужність індуктивного елемента має одиницю виміру – вольт-ампер реактивний (ВАр).

5.3. Потужність ємнісного елемента

Миттєве значення потужності в колі з ємнісним елементом дорівнює

$$p_C = u_C i = -U_C I \sin(2\omega t + 2\psi_i). \quad (5.4)$$

Вираз (5.4) відрізняється від (5.2) знаком, тобто миттєва потужність ємнісного елемента відрізняється від потужності індуктивного за фазою. Отже, середнє значення потужності кола з ємнісним елементом також дорівнює нулю

$$P_C = \frac{1}{T} \int_0^T p_C dt = 0.$$

Як і в колі з індуктивним елементом, тут спостерігаються процеси колювання енергії $W_C = C u_C^2 / 2$ і чергування проміжків часу, протягом яких енергія від джерела накопичується в електричному полі ємнісного елемента, з проміжками часу, коли енергія з кола повертається до джерела.

Амплітуду колювання потужності в колі з ємністю називають *реактивною ємнісною потужністю*, яка дорівнює

$$Q_C = U_C I = I^2 X_C. \quad (5.5)$$

Як і реактивну індуктивну потужність, реактивну ємнісну потужність вимірюють у ВАр.

5.4. Потужності кола в загальному випадку

Загальний випадок кола синусоїдного струму можна розглянути на прикладі деякого пасивного двополюсника П (рис. 5.3), який містить електричне коло з довільним набором пасивних елементів R , L і C .

Таке коло може бути перетворено до еквівалентного з'єднання, зокрема до кола, яке складається з трьох послідовно з'єднаних елементів R , L і C (рис. 4.1) зі збереженням на зовнішніх затискачах значень напруги U , струму I та кута зсуву фаз φ .

Миттєва потужність такого кола дорівнюватиме добутку струму ділянки на загальну напругу

$$p = ui = (u_R + u_L + u_C)i = p_R + p_L + p_C,$$

або, використовуючи вирази для миттєвих потужностей відповідних елементів

$$p = p_R + p_L + p_C = U_R I (1 - \cos 2\omega t) + (U_L I - U_C I) \sin(2\omega t + 2\psi_i). \quad (5.6)$$

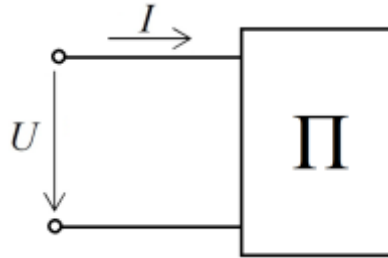


Рис. 5.3. Пасивний двополюсник

Середнє значення потужності (активна потужність) для випадку, коли реактивний опір кола має індуктивний характер і струм відстає за фазою від напруги на кут φ , показано на рис. 5.4, б.

Середнє значення потужності забезпечується тільки доданком p_R , тому активна потужність ділянки кола становитиме $P = U_R I = I^2 R$.

З трикутника опорів можна визначити активний опір як $R = Z \cos \varphi$. Отже, враховуючи, що $P = I^2 Z \cos \varphi$, отримаємо загальну формулу для *активної потужності*, виражену через напругу, струм і кут зсуву фаз між ними

$$P = UI \cos \varphi. \quad (5.7)$$

Доданки p_L і p_C мають середнє значення потужності, що дорівнює нулю. Амплітуда коливань (*реактивна потужність*), як впливає з виразу (5.6), дорівнює

$$Q = U_L I - U_C I.$$

Використовуючи трикутник опорів, звідки $X_L - X_C = Z \sin \varphi$, можна записати

$$Q = (U_L - U_C) I = (X_L - X_C) I^2$$

або

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (5.8)$$

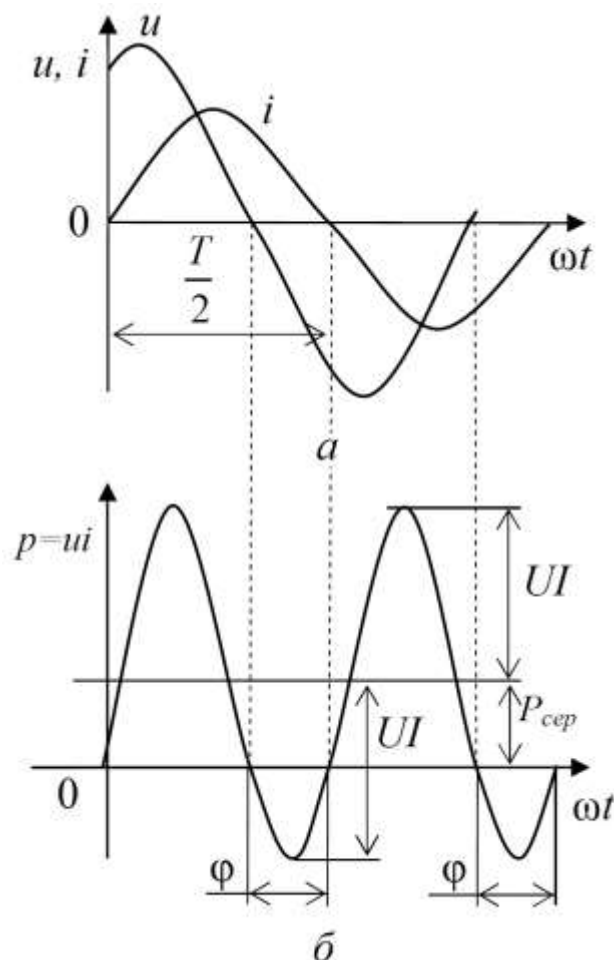


Рис. 5.4. Часові функції напруги, струму і потужності

Крім активної та реактивної потужностей, використовують також *повну* (або *уявну*) *потужність*

$$S = UI, \quad (5.9)$$

яку зазвичай застосовують для оцінки номінальної потужності електротехнічних установок змінного струму. Одиниця вимірювання – вольт-ампер (ВА).

У колах синусоїдного струму розглянуті потужності пов'язані таким виразом

$$S^2 = P^2 + Q^2,$$

що ілюструє трикутник потужностей на рис. 5.5.

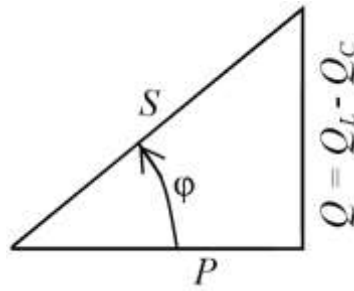


Рис. 5.5. Трикутник потужностей

Показаний трикутник також може використовуватися для визначення кута зсуву фаз між напругою та струмом електричного кола, зокрема

$$\varphi = \arctg \frac{Q_L - Q_C}{P}.$$

5.5. Підвищення коефіцієнта потужності в колах змінного струму

Більшість споживачів електричної енергії змінного струму мають індуктивний характер опору. Тому струм у колі живлення відстає за фазою від напруги джерела. Активна потужність таких споживачів $P = UI \cos \varphi$ за умови, що напруга джерела є номінальною, залежить від коефіцієнта потужності $\cos \varphi$. Зі зменшенням $\cos \varphi$, за заданої активної потужності споживача, його струм зростає:

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Генератори, які живлять споживачів, розраховані на певну номінальну потужність і можуть бути навантажені струмом, який не перевищує номінальне значення. Тому збільшення струму споживача внаслідок зниження його коефіцієнта потужності не повинно перевищувати певних меж. Фактично це означає, що для живлення споживачів із низьким значенням $\cos \varphi$ генератор повинен мати завищену потужність.

Наприклад, зі зниженням коефіцієнта потужності від 1 до 0,5 допустиме навантаження генератора становитиме тільки 50 % від його номінальної потужності. Отже, $\cos\varphi$ показує, як використовується номінальна потужність джерела, тому його називають *коефіцієнтом потужності*.

Робота споживача з малим коефіцієнтом потужності, крім погіршення умов економічного використання джерела живлення, призводить до збільшення потужності втрат не тільки в генераторі, а й у всіх проміжних електротехнічних установках, що входять у ланку передачі та перетворення енергії.

Збільшення струму пропорційно збільшує втрати в лінії передачі електричної енергії. Якщо опір проводів цієї лінії R , то потужність втрат у ній становить

$$\Delta P = RI^2 = \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}. \quad (5.10)$$

Потужність втрат, як видно з (5.10), тим більша, чим нижчий $\cos\varphi$ установки.

Щоб підвищити економічність енергетичних установок, вживають заходів щодо підвищення коефіцієнта потужності споживачів. Зазвичай підвищення коефіцієнта потужності здійснюють штучно, використовуючи явище резонансу струмів.

Загальний струм індуктивного споживача має активний і реактивний складники, зумовлені відповідно його активним та індуктивним опором. Активна потужність споживача, за певної напруги, визначається активним складником струму $P = UI_a$ і повинна залишатися незмінною. Знизити струм споживача в цьому разі можна тільки завдяки зменшенню індуктивного складника струму.

Це можна здійснити за допомогою паралельного ввімкнення до навантаження будь-якого приймача з ємнісним характером опору, наприклад конденсатора.

На рис. 5.6, а наведено еквівалентну схему заміщення споживача з активним R_{cn} та індуктивним X_{cn} опорами і конденсатором C , приєднаним паралельно до споживача.

Відповідна векторна діаграма показана на рис. 5.6, б, звідки видно, що ємнісна вітка кола повинна мати струм, який забезпечує зменшення кута зсуву фаз до потрібного значення.

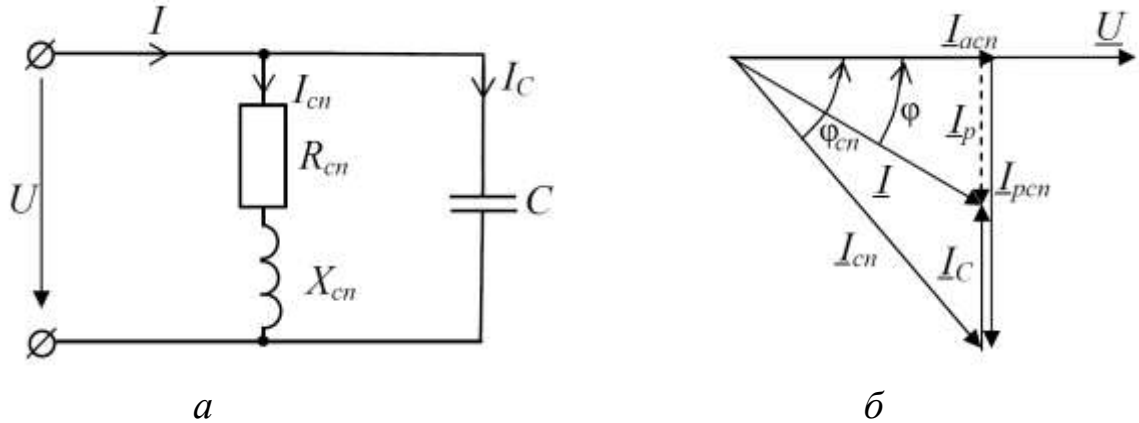


Рис. 5.6. Еквівалентна схема (а) та векторна діаграма (б) компенсації реактивної потужності

З векторної діаграми видно, що для компенсації кута зсуву фаз від значення φ_{cn} до φ струм через ємність має дорівнювати

$$I_C = I_{pcn} - I_p = I_{acn}(\operatorname{tg} \varphi_{cn} - \operatorname{tg} \varphi),$$

де $I_{pcn} = I_{acn} \operatorname{tg} \varphi_{cn}$, $I_p = I_{acn} \operatorname{tg} \varphi$ – реактивні складники струму споживача до та після компенсації відповідно.

Струм I_C у цьому рівнянні може бути виражений через напругу і ємнісний опір ($I_C = U\omega C$), а струм I_{acn} – через потужність і напругу ($I_{acn} = P/U$), тобто

$$U\omega C = \frac{P}{U}(\operatorname{tg} \varphi_{cn} - \operatorname{tg} \varphi),$$

звідки можна знайти значення ємності конденсатора для зменшення кута зсуву фаз від φ_{cn} до φ

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\operatorname{tg} \varphi_{cn} - \operatorname{tg} \varphi).$$

В установках, призначених для компенсації реактивної потужності, встановлюють кілька секцій (батарею) конденсаторів. Оскільки до мережі приєднується зазвичай різна кількість споживачів, які працюють незалежно один від одного, значення

реактивної потужності постійно змінюється. Залежно від її поточного значення автоматично вмикається відповідна кількість конденсаторів. При цьому компенсацію кута зсуву фаз здійснюють зазвичай у межах 0,9–0,95.

Запитання для самоперевірки

1. Побудуйте вектор напруги U і вектор струму I , зсунуті один відносно одного на фазовий кут $\varphi > 0$. Розкладіть той і інший вектори на активний та реактивний складники.

2. Накресліть трикутник потужностей, напишіть формули для визначення сторін цього трикутника.

3. Накресліть графік миттєвої потужності в колі за різних навантажень (активного, індуктивного, ємнісного, змішаного).

4. Що характеризує миттєва потужність кола? Доведіть, що миттєва потужність може мати як додатні, так і від'ємні значення.

5. Чому і як намагаються підвищити коефіцієнт потужності в електричних колах?

Лекція 6. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

6.1. Основні поняття і визначення

Об'єднання в одне коло кількох подібних за структурою однофазних кіл синусоїдного струму однієї частоти з незалежними джерелами енергії широко застосовується в техніці. Найбільшого розповсюдження набула *трифазна система*. Остання була винайдена й розроблена в усіх деталях, включно з трифазним трансформатором і асинхронним двигуном, М. О. Доліво-Добровольським у 1891 р. У наш час трифазні системи широко застосовують для передачі й розподілу електричної енергії.

Трифазним називається електричне коло, у якому діють три синусоїдні ЕРС однакової частоти, що генеруються одним джерелом і зсунуті одна відносно одної за фазою на $1/3$ періоду.

У колах синусоїдного струму під фазою розуміють аргумент синусоїдного струму (напруги та ін.), який відраховується від точки переходу через нуль до додатного значення. Фазу в момент часу $t = 0$ вважають початковою. У багатофазних колах фазою також називають частину електричного кола, у якій може протікати один із струмів багатофазної системи. У такому разі говорять про фазу джерела, фазу приймача, обмотки електричної машини тощо.

Крім трифазної системи, практичне значення має шестифазна система, яка застосовується для живлення двигунів, у пристроях випрямлення змінного струму. У деяких системах автоматики застосовують також двофазну систему.

Для позначення фаз трифазної системи застосовують літери латинського алфавіту. Перша фаза має позначення A або a – початок фази, X або x – кінець фази (великими літерами позначаються фази джерела, малими – навантаження). Усю фазу називають фазою A , дві інші – фаза B і фаза C .

Позначення фаз трифазного генератора наведено на рис. 6.1, а.

За початок фази приймають затискач, через який струм надходить до зовнішнього кола за додатного його значення. Кінці фаз джерела можна з'єднати один з одним, тоді в зовнішньому колі діятиме сумарна ЕРС. Така система називається зв'язаною.

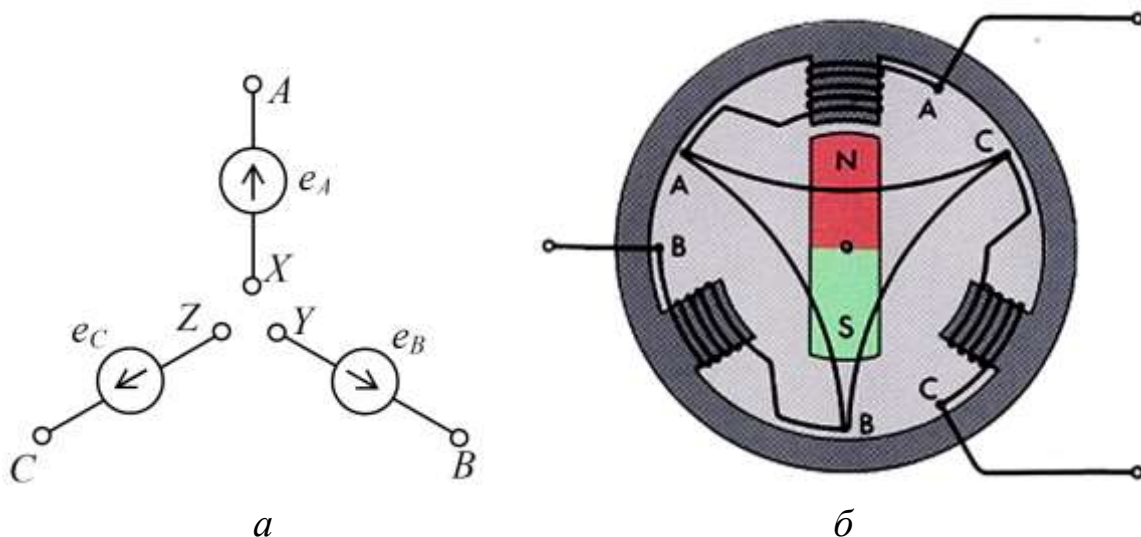


Рис. 6.1. Трифазний генератор: *а* – позначення фаз; *б* – спрощена будова

Трифазну систему ЕРС отримують за допомогою генераторів змінного струму (рис. 6.1, *б*). Під час обертання постійного магніту в кожній котушці (обмотці) наводиться ЕРС, пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, яка змінюється в часі за синусоїдним законом. Завдяки симетричному розташуванню обмоток отримані ЕРС будуть зсунуті одна відносно іншої в часі на третину періоду.

Трифазну систему ЕРС називають *симетричною*, якщо частоти й амплітуди ЕРС кожної з фаз однакові, синусоїдні та зсунуті одна відносно одної на кут $2\pi/3$, тобто на 120° (рис. 6.2).

В аналітичній формі миттєві значення ЕРС, що наводяться у фазах, записують у такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_{Am} \sin \omega t; \\ e_B &= E_{Bm} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ e_C &= E_{Cm} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right). \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

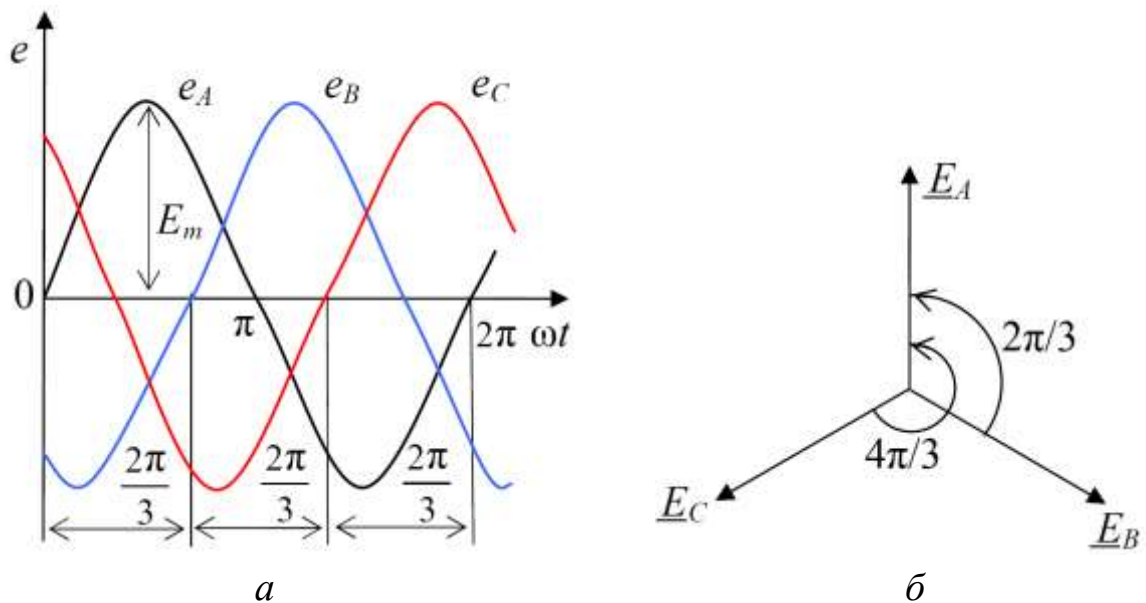


Рис. 6.2. Графічне (а) і векторне (б) зображення трифазної симетричної системи ЕРС

На векторній діаграмі (рис. 6.2, б) фаза B відстає від фази A , а фаза C – від фази B . Таке чергування фаз $A-B-C$ називають прямою послідовністю, а чергування фаз $A-C-B$ – зворотною послідовністю.

Для зменшення кількості провідникових матеріалів і витрат на спорудження ліній електропередач окремі фази трифазного електричного кола з'єднуються між собою. Найпоширенішими є з'єднання «зірка» і «трикутник». Водночас способи з'єднання фаз джерел і фаз споживачів у трифазних системах можуть бути різними.

6.2. З'єднання приймачів зіркою

З'єднанням зіркою називається таке з'єднання, коли кінці x , y , z трьох фаз з'єднуються між собою в одну точку, яка називається *нейтральною* або *нульовою*, а початки фаз a , b і c за допомогою трьох лінійних провідів підключаються до іншої частини кола (рис. 6.3).

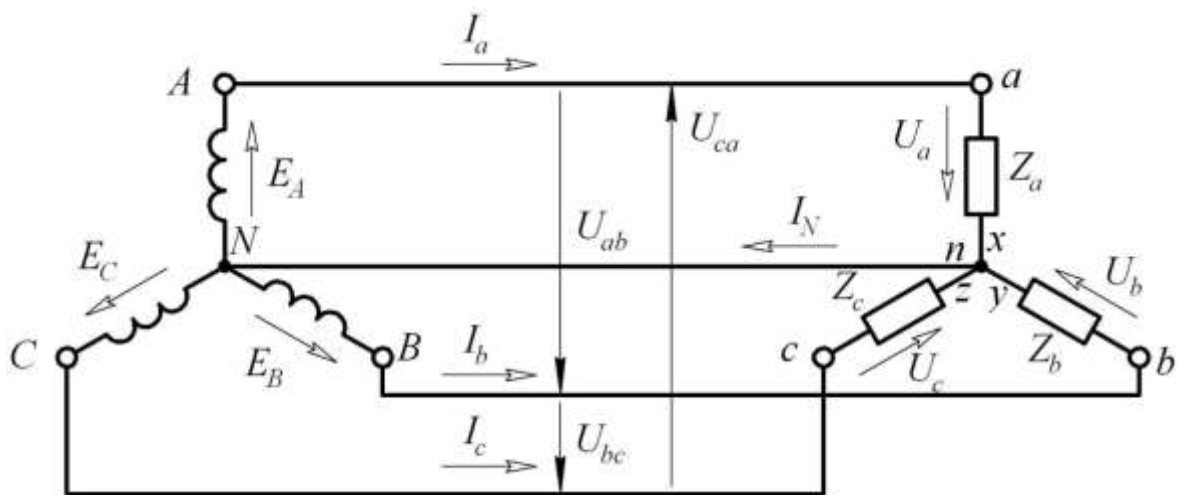


Рис. 6.3. Схема з'єднання джерела та приймача зіркою

Нейтральні точки генератора N та приймача n можуть з'єднуватися між собою *нейтральним проводом*.

У трифазних електричних колах розрізняють фазні й лінійні напруги та струми. Напруги між початками та кінцями окремих фаз називають *фазними* напругами. *Лінійними* називають напруги між початками фаз джерела чи приймача або між лінійними проводами.

На рис. 6.3 фазні напруги – U_a , U_b , U_c , лінійні напруги – U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} . Застосовуючи другий закон Кірхгофа для контурів $nabn$, $nbcn$ і $nscan$, отримаємо такі рівняння, що пов'язують вектори лінійних і фазних напруг:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b; \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c; \underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a. \quad (6.2)$$

У *симетричній* системі напруг між лінійними $U_{\text{л}}$ та фазними $U_{\text{ф}}$ напругами дотримується співвідношення

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (6.3)$$

Для розрахунків і побудови векторних діаграм для фазних напруг зазвичай беруть такі початкові фази: для фази A – $\psi_{U_a} = 0$; для фази B – $\psi_{U_b} = -2\pi/3$ (-120°); фази C – $\psi_{U_c} = -4\pi/3$ (-240°).

Струми, що протікають у фазах джерела або приймача, називають *фазними струмами*.

Струми, які протікають у лінійних проводах, називаються *лінійними струмами*. Як видно з рис. 6.3, у разі з'єднання зіркою фазні струми дорівнюють лінійним струмам

$$I_{\phi} = I_{\pi}. \quad (6.4)$$

Струм нейтрального проводу можна визначити за першим законом Кірхгофа для вузлової точки n (рис. 6.3)

$$\underline{I}_n = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c. \quad (6.5)$$

Якщо рівні між собою окремо активні та реактивні опори всіх фаз (тобто рівні комплексні опори) приймача, то в такому разі говорять про *симетричне навантаження*.

За симетричного навантаження:

$$\begin{aligned} I_a = I_b = I_c = I_{\phi}; \quad \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_{\phi}; \quad P_a = P_b = P_c = P_{\phi}; \\ Q_a = Q_b = Q_c = Q_{\phi}; \quad S_a = S_b = S_c = S_{\phi}, \end{aligned} \quad (6.6)$$

а струм у нейтральному проводі дорівнює нулю.

Векторна діаграма напруг і струмів приймача в разі з'єднання зіркою, будується таким чином. Вектор напруги фази A спрямовується вертикально вгору, що відповідає повороту комплексної площини на 90° проти годинникової стрілки (рис. 6.4, *а*). Вектор напруги фази B відстає від вектора напруги фази A на кут 120° , а вектор напруги фази C відстає від вектора напруги фази A на кут 240° . Вектори лінійних напруг, побудовані згідно з (6.2), зображають так, щоб вони з'єднували кінці векторів відповідних фазних напруг, як показано на діаграмі.

За активного навантаження кут зсуву між фазними напругами та струмами $\varphi_{\phi} = 0$, тому вектори фазних струмів збігатимуться за напрямками з векторами відповідних фазних напруг. З діаграми видно, що для симетричного навантаження сума векторів фазних струмів дорівнює нулю

$$\underline{I}_n = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0.$$

Несиметричним навантаження вважається тоді, коли комплексний опір хоча б однієї фази не дорівнює комплексному опору інших фаз. Також несиметричним вважається режим повного відключення однієї або двох фаз приймача. Векторна діаграма для несиметричного режиму показана на рис. 6.4, *б*. Струм нейтрального проводу побудований за рівнянням (6.5).

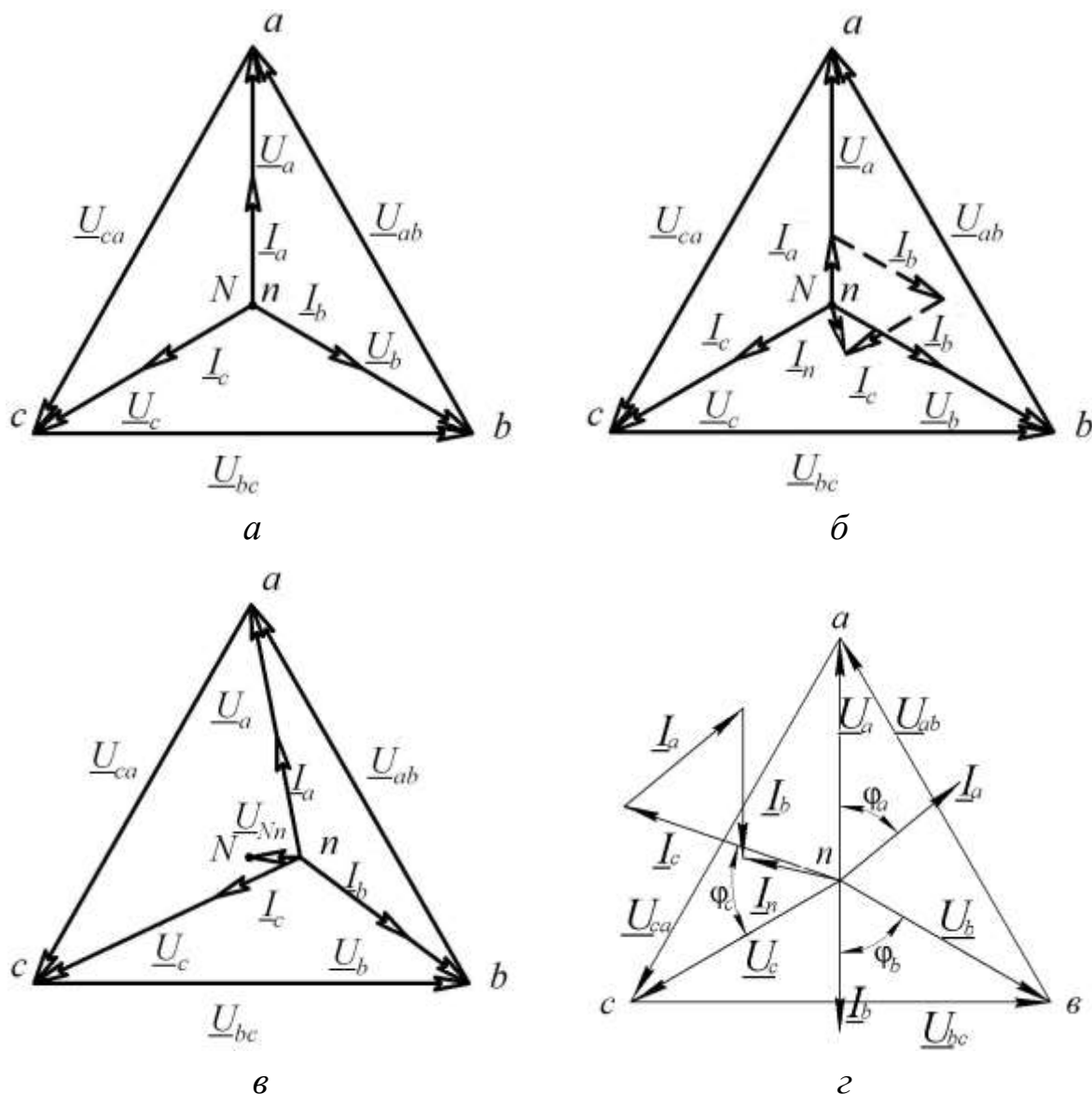


Рис. 6.4. Векторні діаграми напруг та струмів при з'єднанні приймача зіркою: *a* – симетричне активне навантаження; *б* – несиметричне активне навантаження з нейтральним проводом; *в* – несиметричне навантаження без нейтрального проводу; *г* – несиметричне активно-індуктивне навантаження

Трифазне коло, з'єднане зіркою, за несиметричного навантаження повинно обов'язково мати нейтральний провід. За його відсутності значення фазних напруг залежать від значення та характеру фазних опорів і можуть суттєво відрізнятись від номінальних (рис. 6.4, *в*), тобто такий режим роботи кола є аварійним.

Під час побудови векторної діаграми напруг і струмів на основі вимірних даних, за несиметричного режиму без нейтрального проводу (рис. 6.4, в), побудову потрібно починати з векторів лінійних напруг, беручи до уваги, що їх значення та напрямки залишаються незмінними. Потім за допомогою циркуля з точки a проводять дугу з радіусом, що дорівнює довжині вектора $\underline{U}_a$ з урахуванням прийнятого масштабу. Аналогічно з точки b проводять дугу з радіусом, що дорівнює довжині вектора $\underline{U}_b$ (можна взяти інші два вектори фазних напруг, необов'язково $\underline{U}_a$ й $\underline{U}_b$). Із точки перетину двох дуг проводять три вектори фазних напруг. За активного навантаження вектори фазних струмів збігаються за напрямками з векторами відповідних фазних напруг.

Режим несиметричного навантаження, що має активно-індуктивний характер, ілюструє векторна діаграма, зображена на рис. 6.4, г. У цьому разі фазні струми відстають від відповідних фазних напруг за фазою.

6.3. З'єднання приймачів трикутником

З'єднанням трикутником називається таке з'єднання (рис. 6.5), за якого кінець першої фази x з'єднують із початком другої фази b , кінець другої фази y – із початком третьої фази c , а кінець третьої фази z – із початком першої фази a . Початки a, b, c трьох фаз за допомогою трьох лінійних проводів приєднуються до іншої частини кола.

Як видно з рис. 6.5, у разі з'єднання трикутником фазні напруги дорівнюють лінійним, тобто

$$U_{\text{ф}} = U_{\text{л}}. \quad (6.7)$$

Фазні струми в загальному випадку не дорівнюють лінійним. Застосовуючи перший закон Кірхгофа для вузлових точок a, b і c , отримаємо такі співвідношення між фазними та лінійними струмами:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_b = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_c = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \quad (6.8)$$

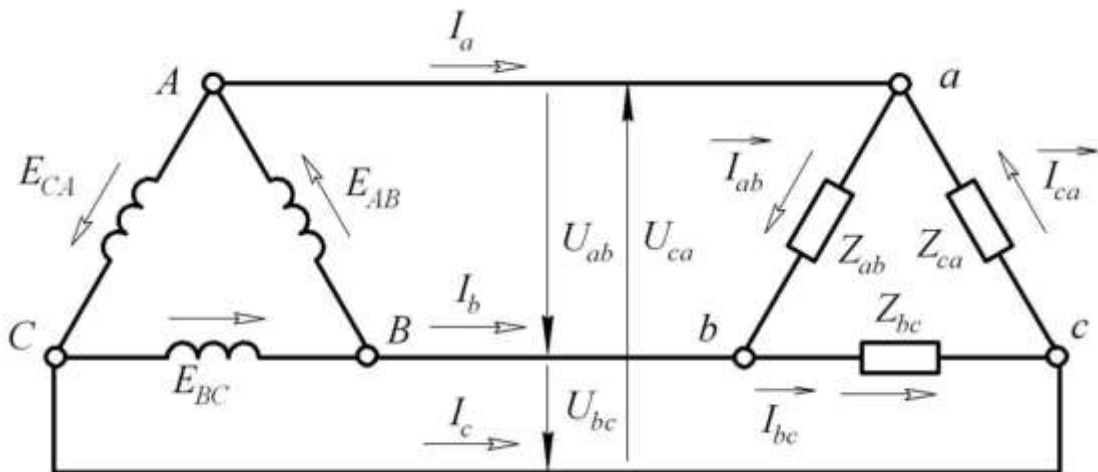


Рис. 6.5. Схема з'єднання джерела та приймача трикутником

Незалежно від типу навантаження векторна сума лінійних струмів завжди дорівнює нулю

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0.$$

Векторна діаграма напруг і струмів у разі з'єднання приймача трикутником будується таким чином. Вектор напруги $\underline{U}_{ab}$ спрямовується вертикально вгору, що відповідає повороту комплексної площини на 90° проти годинникової стрілки (рис. 6.6). Вектор напруги $\underline{U}_{bc}$ відстає від вектора $\underline{U}_{ab}$ на кут 120° , а вектор напруги $\underline{U}_{ca}$ відстає від вектора $\underline{U}_{ab}$ на кут 240° . За активного навантаження кут зсуву між фазними напругами та струмами $\varphi_\phi = 0$, тому вектори фазних струмів збігаються за напрямками з векторами відповідних фазних напруг (рис. 6.6, а). Вектори лінійних струмів побудовані на підставі рівнянь (6.8).

Як видно з векторної діаграми, за *симетричного* навантаження буде таке співвідношення між діючими значеннями струмів

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}. \quad (6.9)$$

За несиметричного навантаження (рис. 6.6, б) фазні струми, кути зсуву фаз та фазні потужності будуть у загальному випадку різними. Особливий випадок несиметрії – повне розвантаження фази AB . У цьому разі $\underline{I}_{ab} = 0$, $\underline{I}_a = -\underline{I}_{ca}$, $\underline{I}_b = \underline{I}_{bc}$ (рис. 6.6, в).

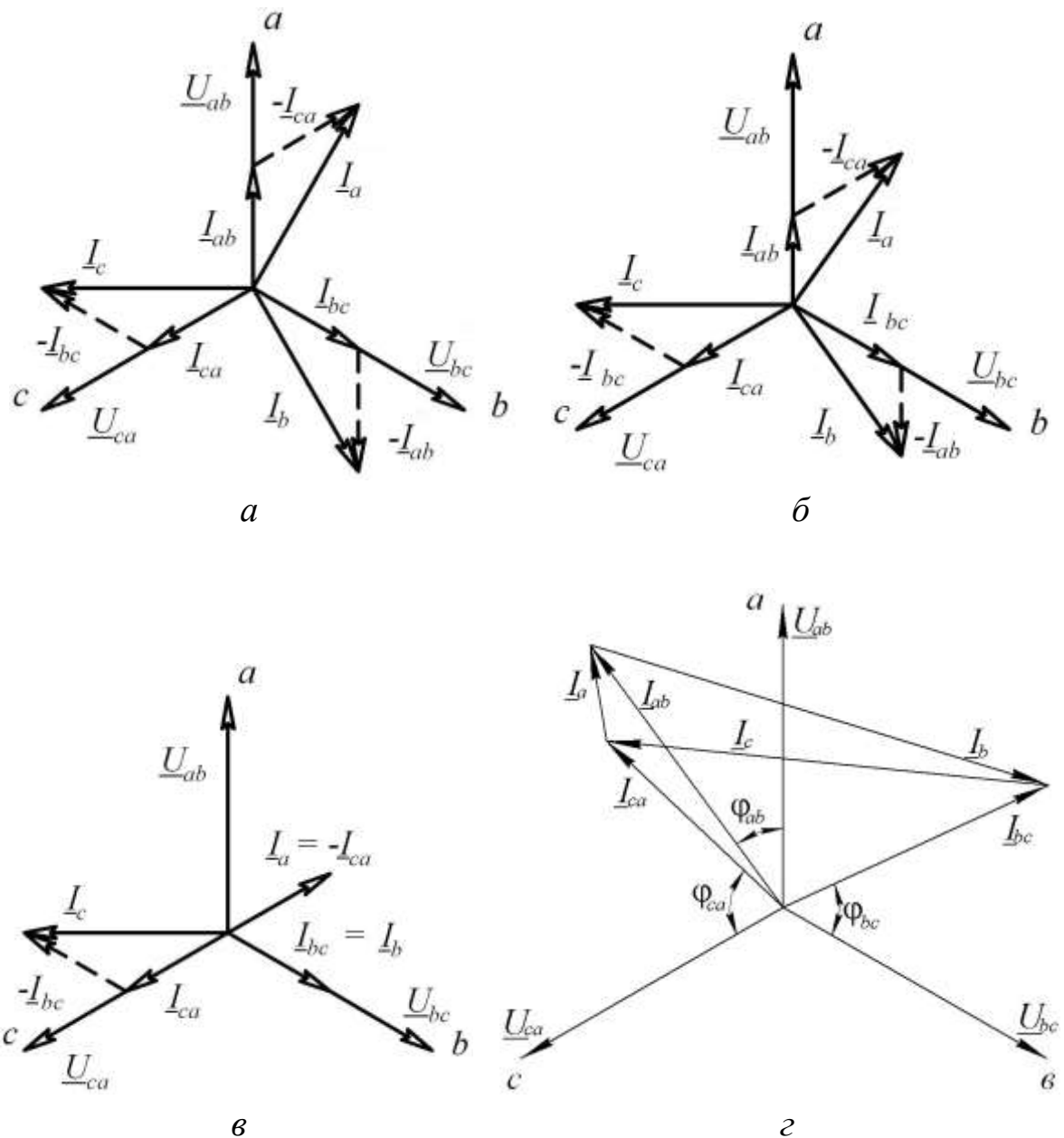


Рис. 6.6. Векторні діаграми напруг та струмів при з'єднанні приймача трикутником: *a* – симетричне навантаження; *б* – несиметричне навантаження; *в* – несиметричне навантаження при розвантаженні фази *AB*; *г* – несиметричне активно-індуктивно-ємнісне навантаження

Режим несиметричного навантаження також ілюструє векторна діаграма, зображена на рис. 6.6, *г*. Тут у фазах *AB* та *BC* навантаження має активно-ємнісний характер, а у фазі *CA* – активно-індуктивний.

На сьогодні виробництво, розподіл та споживання електричної енергії здійснюються переважно у вигляді енергії трифазного змінного струму.

Порівняно з однофазними трифазні електричні кола мають такі переваги: можливість отримання обертового магнітного поля; менші витрати на спорудження електричних мереж і ліній електропередач; можливість підключення однофазних приймачів, розрахованих на дві різні напруги (фазну та лінійну); кращі економічні показники трифазних електричних машин.

Запитання для самоперевірки

1. У якому розумінні в електротехніці вживається термін «фаза»?
2. Що розуміють під трифазною системою?
3. У якому випадку трифазну систему вважають симетричною?
4. Що називають прямою (зворотною) послідовністю чергування фаз?
5. Що розуміють під нейтраллю трифазної мережі?
6. Які схеми з'єднання фаз застосовують у трифазних мережах?
7. Накресліть векторну діаграму фазних і лінійних напруг споживача, увімкненого за схемою «зірка».
8. Накресліть векторну діаграму напруг і струмів споживача, увімкненого за схемою «трикутник».
9. Запишіть співвідношення для активної, реактивної та повної потужностей трифазного симетричного кола.

Лекція 7. ТРАНСФОРМАТОРИ

7.1. Основні поняття і визначення

Трансформатор – це статичний (без частин, що обертаються) електромагнітний пристрій, призначений для перетворення параметрів змінних напруг і струмів (найчастіше амплітуд і фаз). В основі принципу дії трансформатора лежить явище електромагнітної індукції.

Винайдення трансформатора дало змогу вирішити проблему трансформації та передачі електричної енергії на великі відстані.

За призначенням трансформатори можна поділити на чотири основні групи: силові, вимірювальні, імпульсні та радіотрансформатори.

Найбільш поширеними є *силові трансформатори*. Вони застосовуються в системах передачі й розподілу електричної енергії, для живлення виконавчих та інших промислових механізмів, систем автоматики та керування, для зварювання, нагрівання тощо.

Виробництво енергії на електростанціях здійснюється за допомогою синхронних генераторів напругою 6–20 кВ. Передача енергії на великі відстані супроводжується втратами потужності в проводах ліній електропередач. За таких умов економічно є більш доцільним передавати енергію з більшою напругою, що дає змогу зменшити струм у лінії за незмінної потужності. Тому на електростанціях встановлюють підвищувальні трансформатори, а в місцях споживання – знижувальні, які перетворюють енергію до номінальної напруги живлення приймачів. Залежно від потрібної напруги таке перетворення може бути багатократне (рис. 7.1).

Радіотрансформатори застосовуються в радіоелектроніці. Вони призначені для узгодження опорів або напруг між різними частинами електричного кола (узгоджувальні трансформатори) і можуть поділятися на входні, проміжні або вихідні. Розділові

трансформатори виконують функцію гальванічного розділення кіл джерела та навантаження.

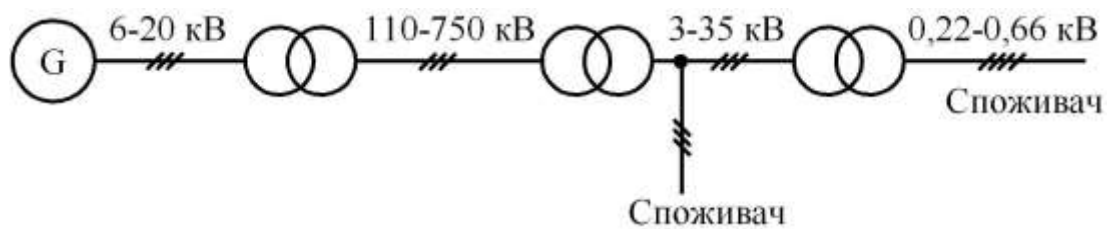


Рис. 7.1. Передача електричної енергії на великі відстані

Трансформатори, що використовуються для передачі або формування імпульсів напруги чи струму різної форми, називаються *імпульсними*. До цього типу, зокрема, належать пікові трансформатори, які формують імпульси у вигляді гострих короткочасних піків.

Вимірювальні трансформатори (трансформатори струму і трансформатори напруги) широко застосовуються для вимірювання великих напруг, струмів і потужностей. Їх використання дає змогу розширити межі вимірювання приладів, а також ізолювати вимірювальні та захисні кола від високої напруги.

За конструктивними особливостями трансформатори можуть відрізнятися кількістю та типом обмоток, числом фаз, формою магнітопроводу, типом охолодження й ін.

Розрізняють одно-, дво- та багатообмоткові трансформатори. Трансформатор з однією обмоткою називається *автотрансформатором*. Багатообмоткові трансформатори мають декілька вторинних обмоток, зазвичай із різною кількістю витків, намотаних проводом різного діаметра, і з різним значенням номінальної напруги.

Залежно від форми магнітопроводу трансформатори бувають стрижневими, броньовими, броньострижневими, тороїдними.

Охолодження трансформатора може бути повітряним або оливним, примусовим чи природним.

Крім того, трансформатори розрізняють за напругою (високовольтні, низьковольтні), за потужністю (малої, середньої та великої потужності) та за робочою частотою (низької частоти, промислової частоти, високої частоти).

7.2. Будова та принцип дії трансформатора

Основними складовими частинами однофазного двообмоткового трансформатора (рис. 7.2) є феромагнітний магнітопровід *1*, на двох *стрижнях* якого закріплені обмотки *2*. Частина магнітопроводу, що не містить обмоток і призначена для замикання магнітного кола, називається *ярмом*. Для зменшення втрат від вихрових струмів магнітопровід набирається із штампованих пластин (товщиною 0,35–0,5 мм за робочої частоти до 150 Гц) чи намотується з полос електротехнічної сталі. Пластини ізолюються одна від одної шаром лаку або за допомогою оксидування.

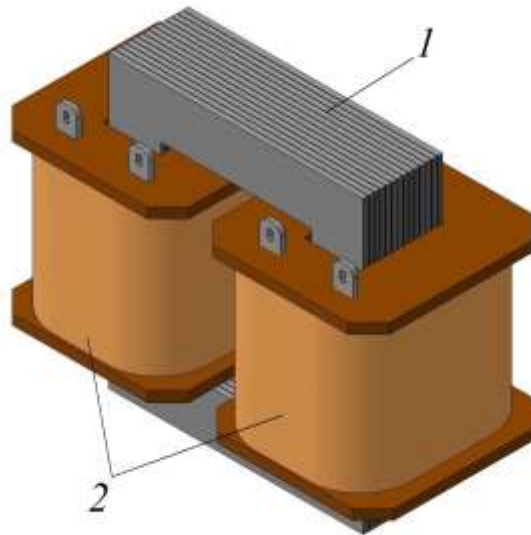


Рис. 7.2. Будова однофазного трансформатора

У трансформаторах із *броньовим* магнітопроводом (рис. 7.3, б) обмотки розміщуються на центральному стрижні, що частково захищає їх від механічного впливу.

Конструкція з *тороїдним* типом магнітопроводу (рис. 7.3, в) застосовується рідко через складність намотки обмоток.

Обмотки трансформатора найчастіше виконують мідним обмотковим проводом, діаметр якого обирають залежно від густини струму.

Кількість витків у обмотках зазвичай різна й залежить від номінальної напруги трансформатора, його потужності та характеристик магнітопроводу.

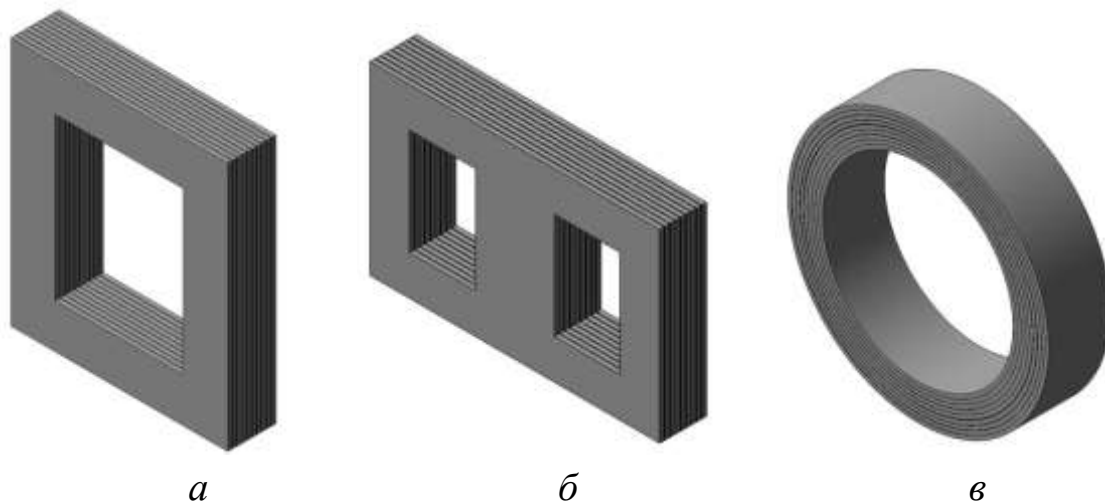


Рис. 7.3. Конструкція магнітопроводів трансформатора:
а – стрижневий; б – броньовий; в – тороїдний

Обмотку, яка приєднується до мережі, потрібно вважати *первинною* і записувати всі величини, що до неї належать (струм, напругу тощо), з індексом 1. Обмотка, до якої приєднується навантаження, називається *вторинною*, а відповідні їй величини записуються з індексом 2. Відношення кількості витків первинної обмотки w_1 до кількості витків вторинної w_2 має назву *коефіцієнт трансформації*

$$n = \frac{w_1}{w_2}. \quad (7.1)$$

Обмотку з більшою кількістю витків називають *обмоткою вищої напруги* (ВН), а обмотку з меншою кількістю витків – *обмоткою нижчої напруги* (НН). На електричних схемах затискачі обмотки ВН позначають A, X , а затискачі обмотки НН – a, x .

Принцип дії трансформатора є таким. З подачею до первинної обмотки змінної напруги U_1 у ній починає протікати змінний струм I_1 (рис. 7.4). Магніторушійна сила (МРС) цієї обмотки $F_1 = i_1 w_1$ утворює змінний магнітний потік з амплітудою Φ_m , який замикається через феромагнітний магнітопровід, пронизуючи витки вторинної обмотки. Умовний додатний напрямок магнітного потоку визначається за правилом правого гвинта. Тобто додатний напрямок магнітного потоку співпадає з напрямком руху гвинта, що обертається за напрямком циркуляції струму в обмотці.

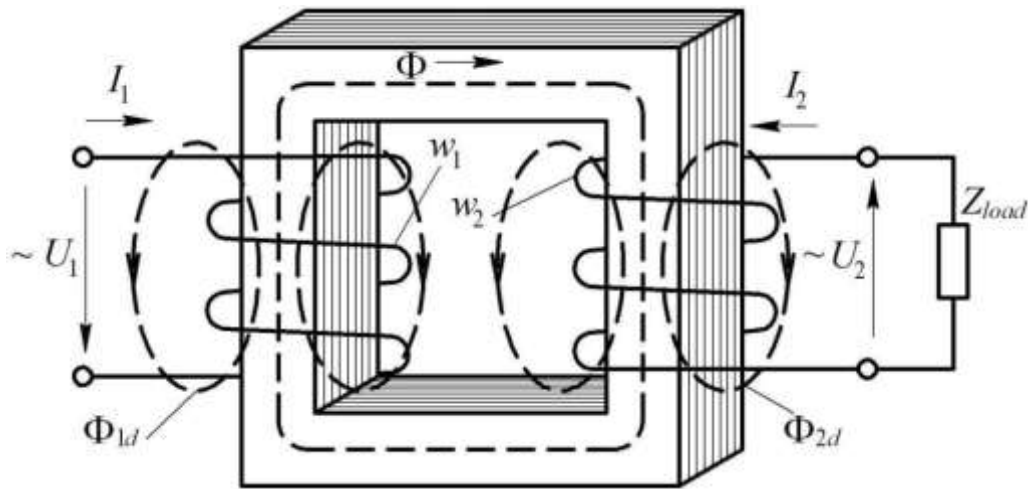


Рис. 7.4. Схема трансформатора

Оскільки струм змінний, то змінний і магнітний потік, а отже, згідно із законом електромагнітної індукції, у вторинній обмотці наводиться ЕРС взаємної індукції, яка дорівнює швидкості зміни магнітного потокозчеплення обмотки Ψ_2

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t, \quad (7.2)$$

де $\Psi_2 = w_2 \Phi_m \sin \omega t$ – потокозчеплення вторинної обмотки за умови синусоїдного магнітного потоку; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; f – частота напруги живлення.

З виразу (7.2) діюче значення ЕРС вторинної обмотки визначиться за формулою

$$E_2 = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \Phi_m f w_2. \quad (7.3)$$

Унаслідок зміни магнітного потоку в первинній обмотці також індукується ЕРС (самоіндукції), миттєве та діюче значення якої визначаються аналогічно, тобто:

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t; \quad (7.4)$$

$$E_1 = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \Phi_m f w_1. \quad (7.5)$$

Якщо до вторинної обмотки підключити навантаження, то під дією ЕРС E_2 в ній почне протікати струм I_2 , а на затискачах навантаження встановиться напруга U_2 . Значення цієї напруги залежить від поданої первинної напруги та властивостей трансформатора (коефіцієнта трансформації, опорів обмоток тощо). Отже, електрична енергія передається з первинної обмотки до вторинної, але з іншою напругою. У процесі роботи первинна обмотка здійснює перетворення електричної енергії мережі в енергію магнітного поля, а вторинна обмотка перетворює енергію магнітного поля в електричну. Невелика частина потужності втрачається у трансформаторі через втрати в обмотках і магнітопроводі.

Магніторушійна сила вторинної обмотки $F_2 = i_2 w_2$ також збуджує магнітний потік, спрямований згідно з правилом Ленца протилежно потоку первинної обмотки. Тому загальний потік є результатом взаємодії МРС обох обмоток.

Крім магнітного потоку, що замикається через осердя і є спільним для обох обмоток (*основний магнітний потік*), кожна з обмоток також створює власні потоки розсіювання Φ_{1d} , Φ_{2d} , які індукують ЕРС розсіювання в первинній і вторинній обмотках, відповідно E_{1d} , E_{2d} .

Якщо кількість витків первинної обмотки w_1 більше кількості витків вторинної w_2 , то $U_1 > U_2$ і трансформатор працюватиме в режимі зменшення напруги (*знижувальний трансформатор*). Трансформатор, що працює в режимі збільшення напруги $U_1 < U_2$, $w_1 < w_2$, називається *підвищувальним*.

Той самий трансформатор може бути як підвищувальним, так і знижувальним, залежно від того, до якої обмотки подається живлення, а до якої приєднується навантаження.

З виразів (7.5) і (7.3) випливає, що коефіцієнт трансформації можна визначити також як відношення ЕРС обмоток, тобто

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2}.$$

Конструкція, наведена на рис. 7.4, є базовою для аналізу та розрахунку інших конструкцій трансформаторів (багатообмоткових, трифазних та ін.).

7.3. Режим холостого ходу трансформатора

У режимі холостого ходу (ХХ) вторинна обмотка трансформатора розімкнена, тобто струм у ній $I_2 = 0$, а в первинній обмотці протікає струм холостого ходу I_{1o} .

Напруга u_{1o} , прикладена до первинної обмотки трансформатора, врівноважуватиметься ЕРС первинної обмотки e_1 , ЕРС розсіювання e_{1d} та падінням напруги на активному опорі первинної обмотки $R_1 i_{1o}$:

$$u_{1o} = -e_1 - e_{1d} + R_1 i_{1o}$$

або у векторній формі

$$\underline{U}_{1o} = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{1d} + R_1 \underline{I}_{1o}. \quad (7.6)$$

Оскільки вектор $\underline{E}_{1d}$ відстає від струму холостого ходу на кут $\pi/2$, то в комплексній формі ЕРС розсіювання запишеться $\underline{E}_{1d} = -jX_1 \underline{I}_{1o}$, а рівняння електричної рівноваги (7.6) можна представити у вигляді

$$\underline{U}_{1o} = -\underline{E}_1 + jX_1 \underline{I}_{1o} + R_1 \underline{I}_{1o}, \quad (7.7)$$

де $X_1 = \omega L_1$ – індуктивний опір розсіювання первинної обмотки; L_1 – індуктивність розсіювання первинної обмотки.

Насправді струм холостого ходу I_{1o} не є синусоїдним унаслідок нелінійної магнітної характеристики матеріалу

магнітопроводу. Тому для використання комплексної форми запису рівнянь трансформатора його струм представляють *еквівалентним синусоїдним струмом*. Таку заміну виконують так, щоб діюче значення еквівалентного синусоїдного струму дорівнювало діючому значенню струму холостого ходу. Тут і далі вважається, що всі величини, які входять до складу рівнянь трансформатора, є синусоїдними.

Схему заміщення трансформатора в режимі ХХ, згідно з рівнянням (7.7), показано на рис. 7.5. Струм ХХ I_{10} представлений двома складниками – реактивним I_{reac} , який забезпечує протікання в магнітопроводі основного потоку Φ_m і активним I_{act} , що зумовлений втратами на гістерезис та вихрові струми. Вхідний опір трансформатора в режимі холостого ходу дорівнює сумі повних опорів контуру розсіювання $\underline{Z}_1$ та контуру намагнічування $\underline{Z}_m$.

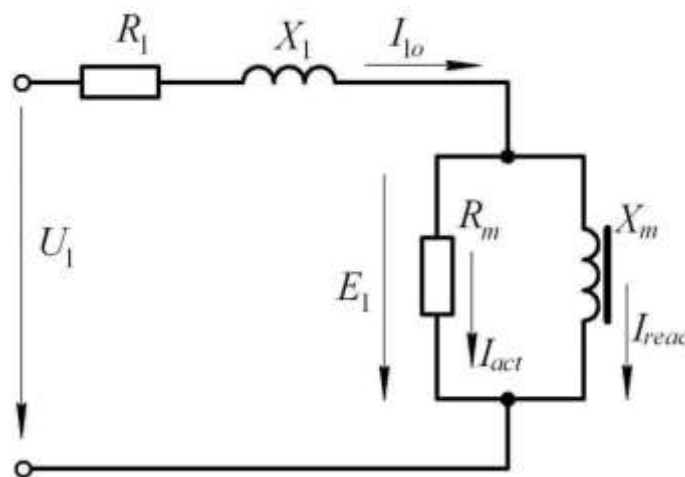


Рис. 7.5. Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

Проведення дослідів холостого ходу дає змогу експериментально визначити параметри контуру намагнічування схеми заміщення й інші характеристики трансформатора. Найчастіше дослід проводять для випадку, коли $U_{10} = U_{1nom}$, при цьому вторинну обмотку трансформатора розмикають (рис. 7.6), тобто $I_2 = 0$.

За результатами цього дослідів визначають:

коефіцієнт потужності в режимі холостого ходу

$$\cos \varphi_{1o} = \frac{P_o}{U_{1o} I_{1o}}$$

та кут магнітних втрат $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi_{1o}$;

відсоткове значення струму холостого ходу відносно номінального значення $I_{1o} \% = \frac{I_{1o}}{I_{1nom}} 100\%$;

коефіцієнт трансформації напруг

$$K_U = \frac{U_{1o}}{U_{2o}}, \quad (7.8)$$

причому в цьому режимі $U_{1o} \approx E_1$, а $U_{2o} = E_2$, тому

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1o}}{U_{2o}}.$$

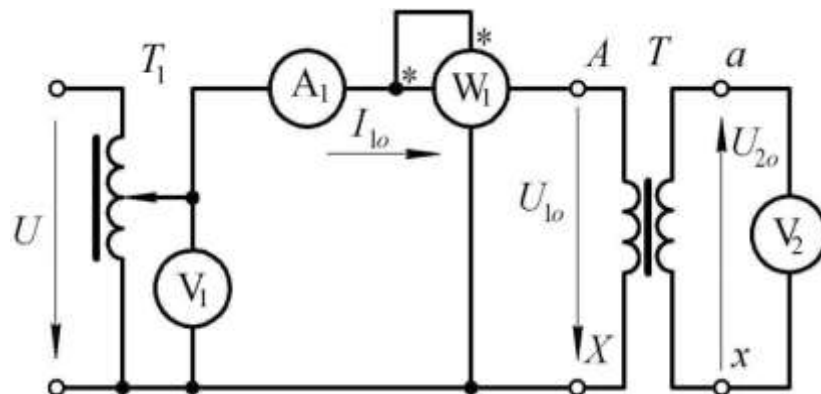


Рис. 7.6. Схема дослідження трансформатора в режимі холостого ходу

Оскільки струму у вторинній обмотці немає, а струм ХХ первинної обмотки силових трансформаторів зазвичай перебуває в межах 3–10 % від номінального, втрати в провідниках обмоток будуть незначні. Практично можна вважати, що потужність ХХ P_o дорівнює потужності магнітних втрат P_{mag} , оскільки останні пропорційні квадрату підведеної напруги U_{1o}^2 і будуть наявні повністю

$$P_o \approx P_{mag}.$$

У схемі заміщення трансформатора для режиму ХХ (рис. 7.5) активний опір контуру намагнічування $R_m \gg R_1$, а реактивний опір контуру намагнічування $X_m \gg X_1$, тому параметри контуру намагнічування наближено можна визначити за паспортними даними згідно виразів:

$$R_m \approx \frac{P_o}{I_{act}^2} = \frac{P_o}{(I_{1o} \cos \varphi_{1o})^2} = \frac{U_{1nom}}{I_{1o} \cos \varphi_{1o}}; \quad (7.9)$$

$$X_m \approx \frac{Q_o}{I_{reac}^2} = \frac{Q_o}{(I_{1o} \sin \varphi_{1o})^2} = \frac{U_{1nom}}{I_{1o} \sin \varphi_{1o}}, \quad (7.10)$$

$$\text{де } \varphi_{1o} = \arccos \frac{P_o}{U_{1nom} I_{1o}}.$$

7.4. Робота трансформатора з навантаженням

Основний магнітний потік, що збуджується МРС первинної обмотки в режимі ХХ $F_{1o} = i_{1o} w_1$, індукуює ЕРС у первинній E_1 та вторинній E_2 обмотках. З підключенням до вторинної обмотки навантаження під дією ЕРС E_2 у ній почне протікати струм i_2 . МРС вторинної обмотки $F_2 = i_2 w_2$ спрямована назустріч основному потоку, намагаючись його зменшити. Але зі зменшенням основного потоку ЕРС E_1 також зменшується, що призводить до збільшення струму первинної обмотки I_1 , а отже, і до збільшення МРС первинної обмотки й основного потоку. Практично можна вважати, що значення основного потоку не залежить від навантаження. Рівняння рівноваги МРС запишеться в такому вигляді

$$\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 = \underline{I}_{1o} w_1, \quad (7.11)$$

звідки

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1o} + (-\underline{I}'_2), \quad (7.12)$$

де $\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$ – приведений до параметрів первинної

обмотки струм вторинної обмотки.

Як видно з рівняння для струмів (7.12), зміна навантаження трансформатора призводить до зміни струму первинної обмотки, а отже, і до зміни потужності споживання.

Враховуючи, що струм ХХ зазвичай становить 3–10 % від номінального, з рівняння (7.12) для діючих значень можна записати

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{n},$$

тобто відношення струмів підпорядковується величині, оберненій до коефіцієнта трансформації.

Відповідно до другого закону Кірхгофа, ЕРС основного потоку E_2 та потоку розсіювання E_{2d} врівноважується падінням напруги на активному опорі вторинної обмотки R_2 та напругою в навантаженні U_2 , тобто

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{1d} + R_1 \underline{I}_1, \quad (7.13)$$

$$\underline{E}_2 + \underline{E}_{2d} = R_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2. \quad (7.14)$$

Якщо представити ЕРС E_{1d} , E_{2d} спадами напруг на відповідних індуктивних опорах розсіювання $\underline{E}_{1d} = -jX_1 \underline{I}_1$, $\underline{E}_{2d} = -jX_2 \underline{I}_2$, то рівняння рівноваги матимуть вигляд:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + jX_1 \underline{I}_1 + R_1 \underline{I}_1; \quad (7.15)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - jX_2 \underline{I}_2 - R_2 \underline{I}_2, \quad (7.16)$$

де $X_2 = \omega L_2$ – індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки; L_2 – індуктивність розсіювання вторинної обмотки.

Схема заміщення трансформатора в режимі навантаження (рис. 7.7) відрізняється від схеми заміщення для режиму ХХ наявністю елементів з параметрами вторинної обмотки (X_2 , R_2) та опору навантаження Z_{load} . Приведення опорів у вторинному колі до кількості витків первинної обмотки виконується за такими формулами:

$$R'_2 = n^2 R_2; \quad X'_2 = n^2 X_2; \quad Z'_{load} = n^2 Z_{load}. \quad (7.17)$$

Якщо параметри контуру намагнічування визначаються на підставі досліду ХХ, то експериментальне визначення активних опорів та опорів розсіювання первинної та вторинної обмоток здійснюється за допомогою досліду короткого замикання (КЗ).

Проведення цих двох дослідів дає змогу визначити параметри всіх елементів схеми заміщення трансформатора.

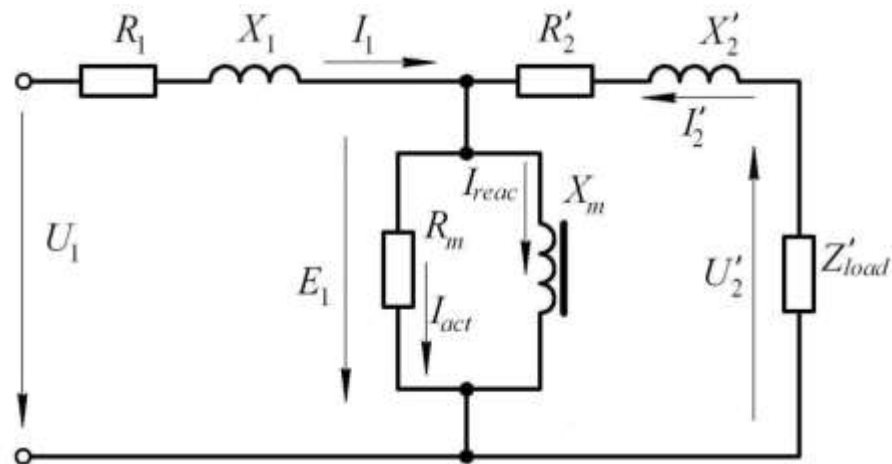


Рис. 7.7. Схема заміщення трансформатора в режимі навантаження

Для проведення дослідів КЗ вторинну обмотку трансформатора замикають накоротко, а до первинної обмотки підводять напругу невеликого значення, за якої струм первинної обмотки дорівнює номінальному $I_{1k} = I_{1nom}$. Цю напругу називають *напругою короткого замикання* і зазвичай для силових трансформаторів вона становить 5–10 % від номінальної напруги первинної обмотки. Схему дослідів КЗ наведено на рис. 7.8.

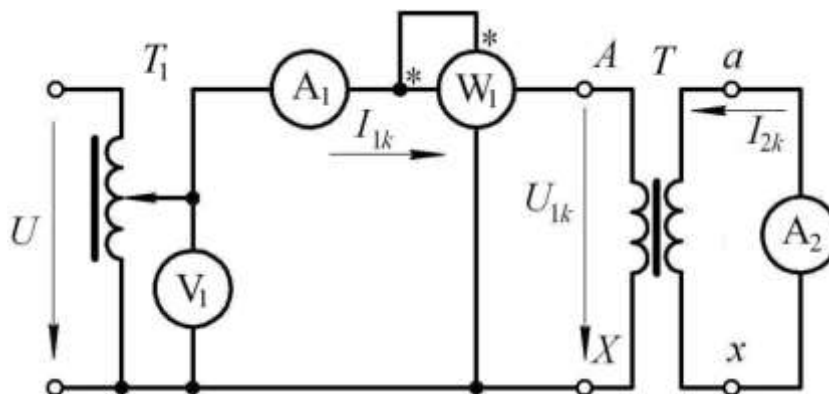


Рис. 7.8. Схема дослідження трансформатора в режимі короткого замикання

Під час дослідження трансформатора в режимі КЗ проводять вимірювання напруги короткого замикання U_{1k} , струмів первинної та вторинної обмоток I_{1k} , I_{2k} , а також потужності споживання P_k . На підставі вимірів визначають:

коефіцієнт потужності в режимі КЗ $\cos \varphi_{1k} = \frac{P_k}{U_{1k} I_{1k}}$;

коефіцієнт трансформації струмів $K_I = \frac{I_{2k}}{I_{1k}}$;

відсоткове значення напруги короткого замикання відносно номінального значення напруги первинної обмотки $U_{1k} \% = \frac{U_{1k}}{U_{1nom}} 100\%$.

У режимі КЗ напруга первинної обмотки, а отже, і магнітний потік трансформатора Φ_m невеликі, тому магнітні втрати потужності є незначними. Оскільки в цьому режимі в обмотках протікають номінальні струми, споживана трансформатором потужність практично дорівнює потужності електричних втрат у номінальному режимі

$$P_k \approx P_{elnom} = I_{1k}^2 (R_1 + R'_2) = I_{1k}^2 R_k,$$

звідки активний опір трансформатора в режимі КЗ

$$R_k = \frac{P_k}{I_{1k}^2}. \quad (7.18)$$

Враховуючи, що повний опір трансформатора дорівнює $Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}$, реактивний опір розсіювання може бути визначений за виразом

$$X_k = (X_1 + X'_2) = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (7.19)$$

Зазвичай

$$R_1 \approx R'_2 \approx \frac{R_k}{2}, \quad X_1 \approx X'_2 \approx \frac{X_k}{2}. \quad (7.20)$$

На підставі наведеної схеми заміщення (рис. 7.7) можна розрахувати й побудувати *робочі характеристики* трансформатора – залежності напруги вторинної обмотки U_2 , коефіцієнта потужності $\cos \varphi_1$, коефіцієнта корисної дії η і струму первинної обмотки I_1 від коефіцієнту навантаження

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2nom}}, \quad (7.21)$$

де I_{2nom} – номінальний струм вторинної обмотки.

Робочі характеристики отримують за незмінних значень коефіцієнта потужності навантаження та номінальної напруги живлення $U_1 = U_{1nom}$, і для більшості силових трансформаторів вони мають типовий вигляд, наведений на рис. 7.9.

Залежність $U_2(\beta)$ називається *зовнішньою характеристикою* трансформатора. На рисунку вона зазначена у відносних одиницях (U_2/U_{2o}). Під час змінювання коефіцієнта навантаження від 0 до 1 напруга вторинної обмотки U_2 зменшується майже лінійно в межах кількох відсотків. Падіння напруги ΔU_2 залежить здебільшого від значення й характеру опору навантаження, а також від параметрів обмоток трансформатора.

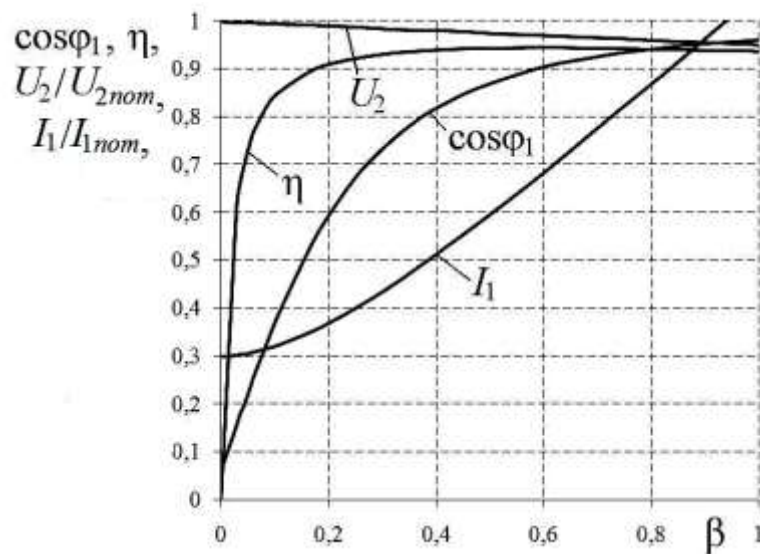


Рис. 7.9. Робочі характеристики трансформатора

Струм первинної обмотки $I_1(\beta)$ (у відносних одиницях I_1/I_{1nom}), починаючи зі значення струму холостого ходу I_{10} , зростає практично лінійно, що випливає з рівняння (7.12).

Крива залежності $\cos\varphi_1(\beta)$ починається зі значення $\cos\varphi_{10}$ і зі зростанням навантаження наближається до значення коефіцієнта потужності навантаження.

Силові трансформатори зазвичай проєктують так, щоб максимальний ККД відповідав навантаженню $\beta = 0,5\text{--}0,6$. Це є наслідком того, що значну частину періоду їх експлуатації вони працюють не на повну потужність.

ККД трансформатора має досить високе значення і тому переважно визначається непрямим методом розрахунку

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}, \quad (7.22)$$

де $\Delta P = P_{mag} + P_{el}$ – потужність втрат у трансформаторі, що являють собою суму втрат у магнітопроводі P_{mag} (магнітних втрат) та електричних втрат у провідниках обмоток P_{el} . Максимальний ККД буде за такого навантаження, коли втрати в сталі (постійні втрати) дорівнюють втратам у провідниках обмоток (змінним втратам) $P_{mag} = P_{el}$.

7.5. Трифазні трансформатори

Процеси, які відбуваються в трифазних трансформаторах, аналогічні до відповідних процесів у однофазних, за умови що навантаження є симетричним.

Трифазні трансформатори широко використовуються як силові пристрої систем виробництва та розподілу електричної енергії. І хоча для трансформації трифазної системи струмів можна використовувати три однофазні трансформатори, об'єднання їх в один апарат дає змогу зменшити кількість провідникових матеріалів, габарити й масу магнітопроводу.

Початки фаз обмоток ВН трифазного трансформатора позначають A, B, C , а їх кінці – X, Y, Z відповідно. Обмотки НН позначають a, b, c – початки, x, y, z – кінці.

У разі живлення трансформатора від трифазної мережі в стрижнях його магнітопроводу збуджуються три фазні магнітні потоки Φ_A, Φ_B, Φ_C (рис. 7.10), які зсунуті один відносно одного на 120° і утворюють симетричну систему. Сума миттєвих значень

фазних потоків у будь-який момент часу дорівнює нулю. Унаслідок цього магнітопровід трифазного трансформатора має тільки три стрижні, які для спрощення конструкції розміщуються в одній площині.

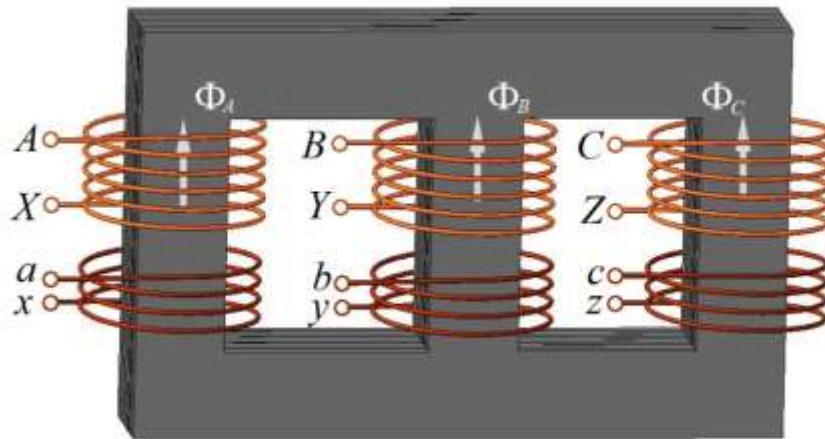


Рис. 7.10. Схема трифазного трансформатора

Завдяки тому, що довжина магнітного кола, по якому замикається потік Φ_B , дещо менша за довжину магнітних кіл потоків Φ_C , Φ_A , виникає незначна магнітна асиметрія, яка спричиняє несиметрію струмів холостого ходу цих фаз. Однак у режимі навантаження трансформатора внаслідок малості останніх це практично не впливає на його роботу.

Фазні магнітні потоки індукують в обмотках трансформатора симетричні системи ЕРС: в обмотках ВН – E_A , E_B , E_C ; в обмотках НН – E_a , E_b , E_c .

Фазні обмотки трансформатора найчастіше з'єднують зіркою Y або трикутником Δ . Схему з'єднання двообмоткового трансформатора позначають у вигляді дробу, у чисельнику якого вказують спосіб з'єднання обмотки ВН, а в знаменнику – обмотки НН, наприклад Y/Y або Y/Δ .

Спосіб з'єднання обмоток впливає на зсув фаз між лінійними ЕРС обмоток ВН та НН. Використовуючи аналогію з годинником, різні способи з'єднання розрізняють за групами. Під *номером групи з'єднання* розуміють час на годиннику, у якого хвилинна стрілка збігається з вектором лінійної ЕРС ВН і встановлена на цифру 0 (12), а годинна стрілка збігається з вектором відповідної лінійної

ЕРС НН. Наприклад, якщо обмотки трансформатора з'єднані за схемою Y/Δ (рис. 7.11, а), то за узгодженого напрямку намотки обмоток ВН та НН вектори відповідних фазних ЕРС матимуть однаковий напрямок (рис. 7.11, б). У разі з'єднання фаз трикутником лінійні ЕРС збігаються із фазними, а і разі з'єднання зіркою відрізняються на 30° . Тому для цієї схеми трикутники лінійних ЕРС відрізняються за фазою на 30° , що відповідає 11-й групі з'єднання (рис. 7.11, в).

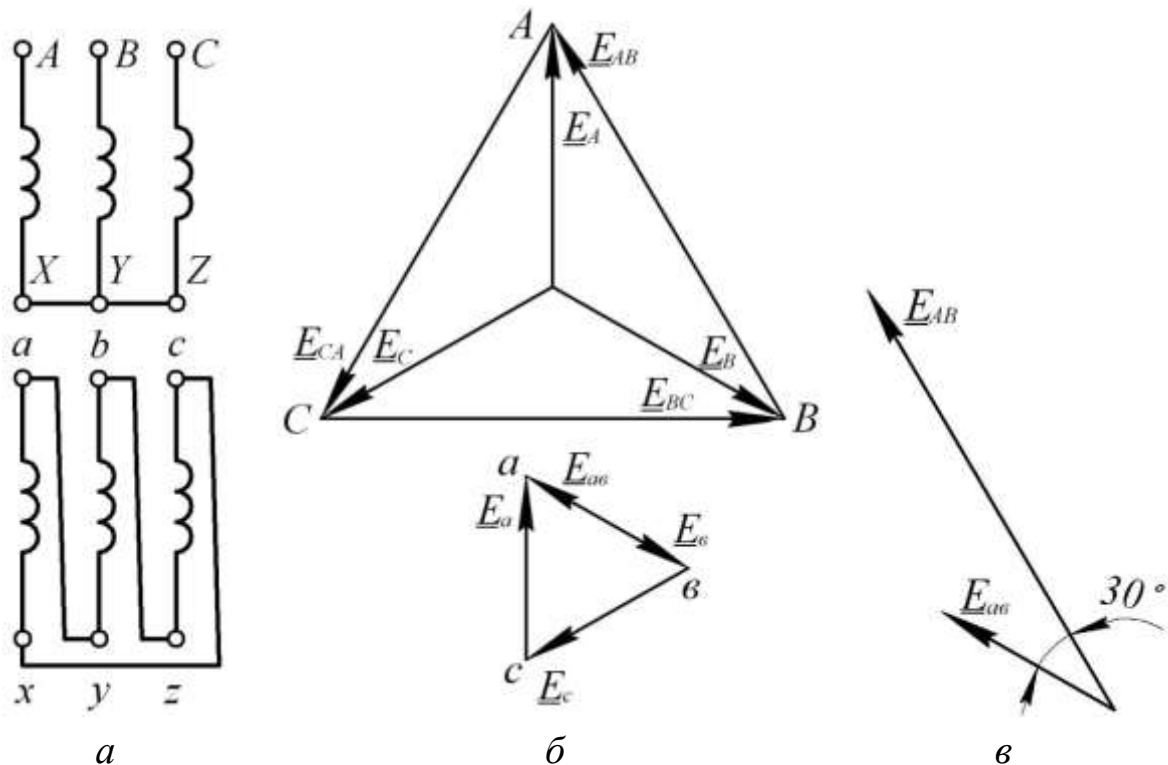


Рис. 7.11. Схема з'єднання обмоток і векторні діаграми ЕРС для групи з'єднань 11

За умови симетрії напруг на первинній обмотці та симетричного навантаження для аналізу трифазного трансформатора можна розглядати роботу тільки однієї фази. Розрахунок проводиться на підставі усередненої схеми заміщення, для якої параметри контурів намагнічування всіх фаз рівні $R_{mA} = R_{mB} = R_{mC}$, $X_{mA} = X_{mB} = X_{mC}$, а також рівні між собою активні та реактивні опори обмоток ВН $R_{1A} = R_{1B} = R_{1C}$, $X_{1A} = X_{1B} = X_{1C}$ і обмоток НН $R_{2a} = R_{2b} = R_{2c}$, $X_{2a} = X_{2b} = X_{2c}$.

Рівняння, що були отримані для однофазного трансформатора, залишаються справедливими і для трифазного, за умови підстановки в них фазних напруг, струмів та потужностей.

7.6. Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори застосовують для вимірювань змінних напруг і струмів. Вимірювальні *трансформатори напруги* призначені для вмикання вольтметрів, частотомірів, обмоток напруги ватметрів і лічильників електричної енергії. *Трансформатори струму* використовують для ввімкнення амперметрів, реле, струмових обмоток ватметрів і лічильників.

На рис. 7.12 наведено схему приєднання вимірювальних приладів через вимірювальні трансформатори до однофазної мережі. Для безпеки доторкання до приладів один затискач вторинної обмотки трансформаторів заземлюють.

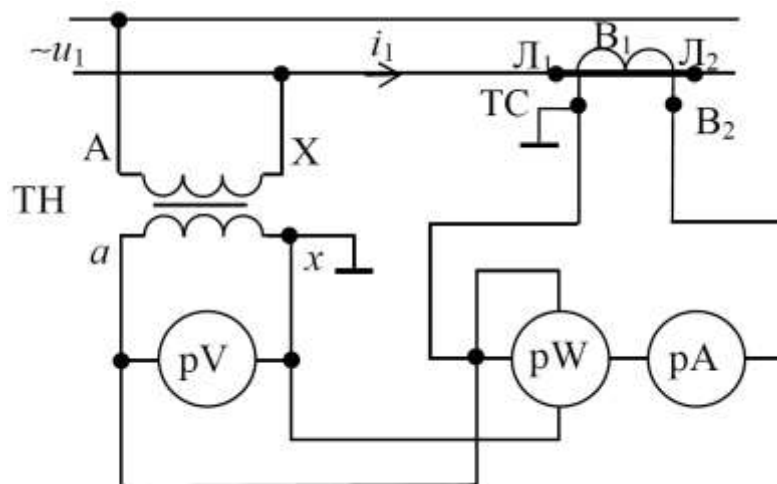


Рис. 7.12. Схеми вмикання трансформаторів напруги і струму

Вимірювані напруга U_1 та струм I_1 :

$$U_1 = n_U U_2, \quad I_1 = n_I I_2,$$

де n_U , n_I – коефіцієнти трансформації трансформаторів напруги та струму відповідно; U_2 , I_2 – покази вольтметра й амперметра відповідно.

Вторинні обмотки мають стандартні значення напруги U_2 та струму I_2 : 100 В для трансформаторів напруги і 5 А та 1 А для трансформаторів струму. Тому діапазон вимірювання може бути розширений за допомогою зміни коефіцієнтів трансформації (співвідношення кількості витків).

Вимірювальний трансформатор напруги працює в режимі, близькому до холостого ходу. Точність вимірювання напруги буде тим вища, чим менше падіння напруги на трансформаторі. Похибка вимірювання

$$\delta_U = \frac{U_2 \frac{w_2}{w_1} - U_1}{U_1} 100\%$$

буде тим менша, чим менші опори обмоток, що досягається зменшенням кількості витків і збільшенням перетину магнітопроводу.

У трансформаторах струму зменшення похибки досягається за допомогою зниження струму I_{10} (для чого використовують стрічковий магнітопровід кільцевої форми з матеріалу з малими втратами) і роботи в ненасиченій ділянці кривої намагнічування.

Запитання для самоперевірки

1. Поясніть призначення і принцип дії трансформатора.
2. Чому магнітопровід трансформатора виконують з електротехнічної, а не зі звичайної сталі, та збирають з окремих тонких, ізольованих один від одного листів?
3. Як розташовують обмотки трансформатора на осерді магнітопроводу?
4. Що називають коефіцієнтом трансформації трансформатора, як його визначити?
5. Для чого використовується електрична схема заміщення трансформатора?
6. Для чого проводять досліди холостого ходу й короткого замикання трансформатора?
7. Як з'єднують обмотки трифазних трансформаторів?

Лекція 8. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

8.1. Принцип дії машини постійного струму

Для пояснення принципу дії машини постійного струму (МПС) розглянемо найпростішу конструкцію, у якій один виток із провідника у вигляді рамки обертається в магнітному полі між двома магнітами 1 із полюсами N і S (рис. 8.1).

Кінці витка обмотки якоря 2 приєднуються до двох мідних пластин колектора 3. По поверхні пластин ковзають нерухомі електропровідні щітки 4, за допомогою яких обмотка приєднується до зовнішнього кола.

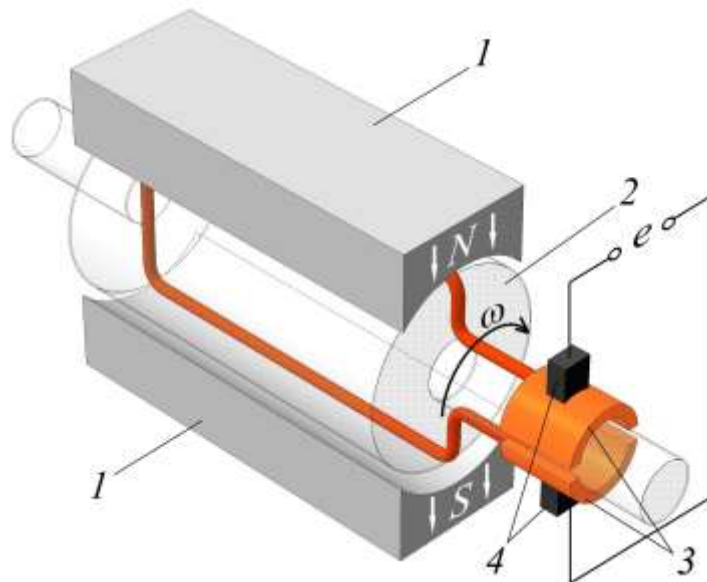


Рис. 8.1. Найпростіша машина постійного струму

Розглянемо спочатку роботу МПС у режимі генератора. Якщо за допомогою приводного двигуна обертати якор, наприклад, за годинниковою стрілкою, то у верхньому та нижньому провідниках його обмотки (рис. 8.1) будуть індукуватись ЕРС, напрямки яких визначається за правилом правої руки. ЕРС усього витка (якоря) складатиметься з ЕРС обох провідників

$$E_a = 2E_{con} = 2BlV, \quad (8.1)$$

де E_{con} – ЕРС провідника; l – активна довжина провідника (тобто та частина провідника, що перебуває в магнітному полі); V –

лінійна швидкість провідника; B – магнітна індукція в повітряному проміжку в місці розташування провідника.

За зазначеного напрямку обертання якоря верхня пластина колектора матиме від’ємний потенціал, а нижня пластина – додатний. Оскільки провідники обмотки якоря по чергово проходять під північним і південним полюсом, напрямок ЕРС змінюється, отже, струм провідника I_{con} також буде змінним, повторюючи за формою криву розподілу магнітної індукції вздовж повітряного проміжку (рис. 8.2, а).

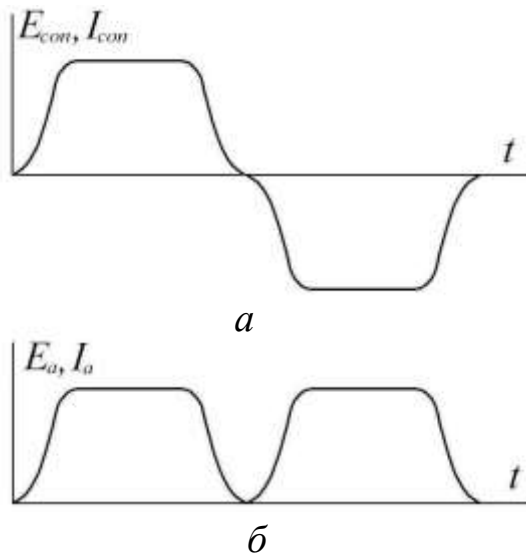


Рис. 8.2. ЕРС і струм витка якоря (а) та в зовнішньому колі (б)

За швидкості обертання якоря n (об/с) частота індукованої ЕРС такої машини дорівнюватиме $f = n$. У загальному випадку з кількістю пар полюсів p частота ЕРС збільшується в p разів, тобто

$$f = pn. \quad (8.2)$$

Через наявність колектора струм, який протікає у зовнішньому колі (рис. 8.2, б), має постійний напрямок. Справді, з поворотом якоря на 90° одночасно зі зміною напрямку ЕРС у провідниках якоря відбувається зміна колекторних пластин під щітками (рис. 8.1). Унаслідок цього під верхньою щіткою завжди перебуває пластина, яка приєднана до провідника, що розташований під північним полюсом, а під нижньою щіткою – пластина, яка приєднана до провідника, що розташований під південним полюсом.

Для нормальної роботи генератора щітки встановлюються таким чином, щоб ЕРС витка дорівнювала нулю в момент переходу щітки з однієї пластини колектора на іншу. Крім того, для зменшення пульсацій випрямленого колектором струму кількість колекторних пластин і провідників обмотки якоря збільшують. Наприклад, якщо пластин 16, пульсація становить менше ніж 1 %.

Напруга постійного струму на затискачах генератора буде менша за ЕРС на значення падіння напруги на активному опорі обмотки якоря

$$U_a = E_a - I_a R_a. \quad (8.3)$$

Якщо до обмотки якоря приєднати джерело постійного струму, то МПС працюватиме в режимі двигуна. Як відомо, на провідник зі струмом I_{con} , що перебуває в магнітному полі, діє сила Ампера

$$F_{con} = l B I_{con}. \quad (8.4)$$

Напрямок цієї сили визначається за правилом лівої руки, тобто для того, щоб якір обертався в напрямку, вказаному на рис. 8.1, до нижньої пластини колектора потрібно приєднати додатний вивід джерела, а до верхньої – від’ємний. Обертальний момент на валу двигуна, який при цьому виникає, дорівнюватиме

$$M = d_a F_{con}, \quad (8.5)$$

де d_a – діаметр якоря.

У режимі двигуна колектор здійснює перетворення постійного струму зовнішнього кола у змінний струм в обмотці якоря, тобто працює як інвертор.

Унаслідок того, що провідники обмотки якоря обертаються в магнітному полі, в них, як і в генераторі, також виникає ЕРС, що визначається виразом (8.1). У режимі двигуна вона спрямована проти струму якоря та прикладеної напруги.

Рівняння рівноваги напруг обмотки якоря має такий вигляд:

$$U_a = E_a + I_a R_a, \quad (8.6)$$

тобто прикладена до двигуна напруга врівноважується ЕРС якоря E_a і падінням напруги на опорі обмотки якоря.

З іншого боку, в генераторному режимі внаслідок протікання струму в обмотці якоря також виникає момент, який у такому випадку є гальмівним. У цьому полягає властивість *оборотності* – кожна машина постійного струму може працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна.

8.2. Будова машини постійного струму

МПС складається з нерухомої частини – статора і рухомої частини – якоря (рис. 8.3). *Статор* містить станину 1, до якої кріпляться головні полюси 2, призначені для створення основного магнітного потоку, і додаткові полюси 3, що слугують для покращення комутації. Кількість головних полюсів залежить від потужності машини та частоти обертання. На головних полюсах розміщені котушки обмотки збудження 4, а на додаткових – обмотка додаткових полюсів 5.

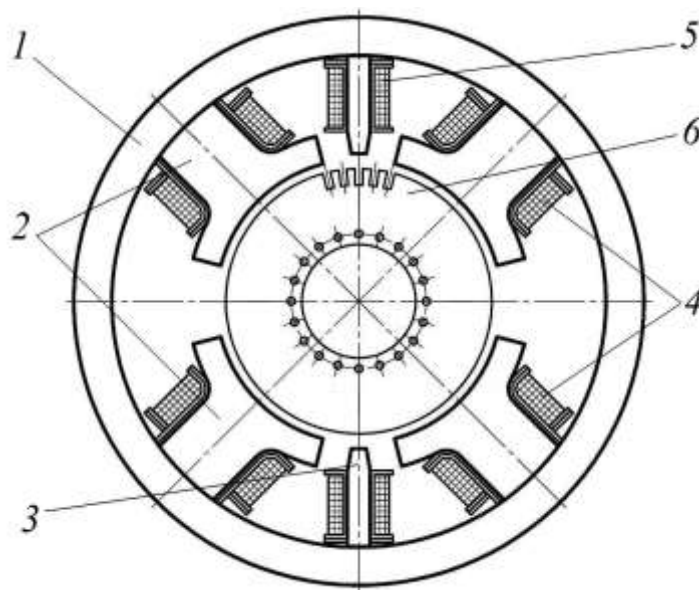


Рис. 8.3. Конструкція машини постійного струму

Для отримання постійного значення магнітної індукції в повітряному проміжку між полюсом та якорем 6, а також зменшення розсіювання осердя головних полюсів мають наконечники спеціальної форми.

Якір МПС має циліндричний магнітопровід 1, складений із листів електротехнічної сталі (рис. 8.4), ізолюваних один від одного шаром лаку для зменшення магнітних втрат. Пакет листів утримується в стиснутому стані за допомогою натискних шайб 2, які одночасно тримають обмотку, і запресовується на вал 3 якоря.

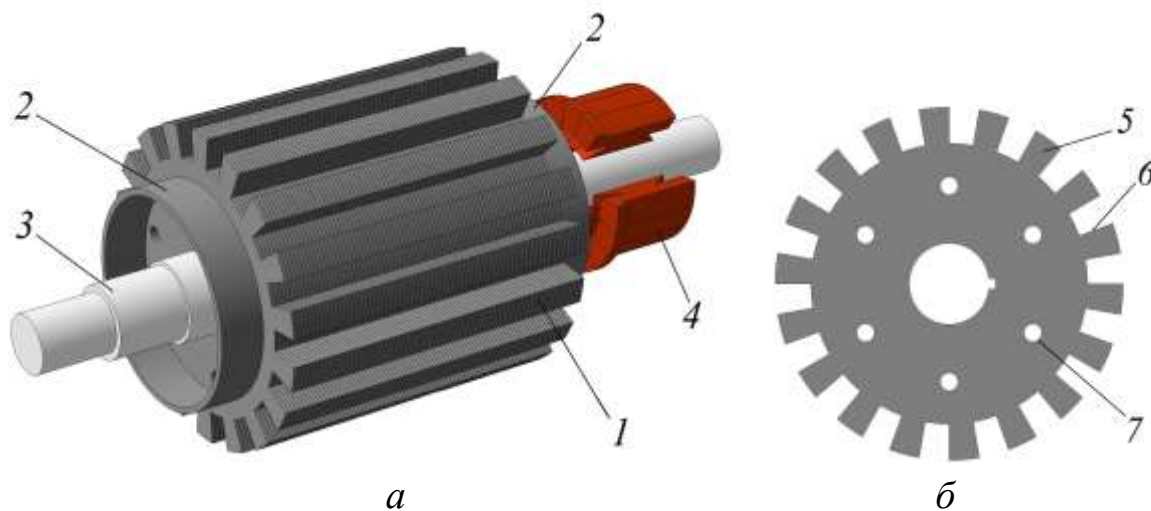


Рис. 8.4. Конструкція якоря: *а* – якір без обмотки; *б* – лист магнітопроводу

Окремі секції обмотки якоря приєднуються до відповідних пластин колектора 4, по поверхні якого під час обертання якоря ковзають щітки (на рис. не показані), забезпечуючи таким чином контакт обмотки з мережею постійного струму. Для кращого ковзання поверхню мідних пластин колектора полірують, а щітки виконують із матеріалу з низьким коефіцієнтом тертя та високою провідністю (наприклад, із пресованого мідно-графітового порошку). Кількість щіток відповідає кількості головних полюсів машини.

Кожен лист пакету магнітопроводу якоря має зубці 5 і пази 6, у які вкладаються секції обмотки, і вентиляційні отвори 7 для покращення умов охолодження машини.

Обмотка якоря виконується зазвичай двошаровою. Вона складається з декількох з'єднаних послідовно секцій, кожна з яких має дві активні сторони, що вкладаються в пази якоря. Для того щоб ЕРС обох сторін склалися, їх розміщують на відстані

близької до полюсної поділки τ (довжині уявної дуги між серединами полюсів) одна від одної. До кожної колекторної пластини приєднують кінець однієї секції й початок наступної, тобто кількість колекторних пластин дорівнює кількості секцій обмотки. За такої конструкції ЕРС усіх секцій складаються і сумарна ЕРС має практично постійне значення.

Обмотки якорів МПС найчастіше виконують петльовими (паралельними), хвильовими (послідовними) та комбінованими (паралельно-послідовними). При цьому секції, що утворюють обмотки, можуть бути одновитковими $w_s = 1$ (тобто мати два активні провідники) або багатовитковими (рис. 8.5).

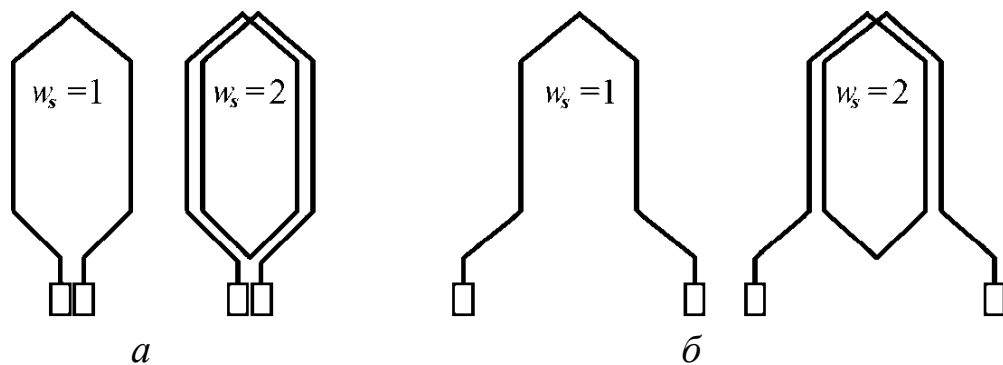


Рис. 8.5. Одновиткова та двовиткова секції: *а* – петльової обмотки; *б* – хвильової обмотки якоря МПС

Для того щоб замкнути хвильову обмотку, потрібно декілька разів обійти окружність якоря. Петльова обмотка замикається після одного обходу якоря.

8.3. Електрорушійна сила якоря та електромагнітний момент машини постійного струму

На відміну від найпростішої, якор реальної машини має феромагнітний магнітопровід, у пази якого вкладаються провідники обмотки. При цьому магнітна індукція має максимальне значення в зубцях і мінімальне значення в зоні, де розташовані провідники. Крім того, обертання якоря призводить до зміни магнітного поля, у

якому перебувають провідники. За таких умов використовувати формулу (8.1) для визначення ЕРС обмотки якоря можливо, якщо ввести в цю формулу середнє значення радіальної компоненти магнітної індукції в проміжку на осі паза, у якому розміщений провідник.

Середнє значення ЕРС провідника в разі його переміщення в межах полюсної поділки дорівнюватиме

$$E_{con.av} = B_{av} l V, \quad (8.7)$$

де B_{av} – середнє значення магнітної індукції.

Щітки ділять обмотку якоря на $2a$ паралельних віток (a – кількість пар паралельних віток). Отже, у кожній паралельній вітці з'єднуються $N/2a$ провідників, і середнє значення ЕРС якоря дорівнює

$$E_a = \frac{N}{2a} B_{av} l V, \quad (8.8)$$

де N – кількість провідників.

Лінійну швидкість провідника V можна виразити через швидкість обертання якоря n (об/хв), полюсну поділку τ і число полюсів $2p$

$$V = \frac{2pn\tau}{60},$$

а магнітний потік одного полюса – через добуток площі поверхні магнітопроводу якоря, що припадає на один полюс S_p та середнього значення магнітної індукції в межах полюсної поділки

$$\Phi = B_{av} S_p = B_{av} l \tau. \quad (8.9)$$

У підсумку ЕРС якоря запишеться

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = c_E \Phi n, \quad (8.10)$$

де $c_E = \frac{pN}{60a}$ – коефіцієнт ЕРС, який залежить від конструктивних особливостей машини.

Значення ЕРС паралельних віток залежить також від місця встановлення щіток на колекторі. Для отримання найбільшої ЕРС щітки встановлюють таким чином, щоб вони замикали накоротко

секції, які розташовані на геометричній нейтралі, тобто на лінії, де магнітна індукція поля головних полюсів дорівнює нулю. У цьому разі ЕРС усіх секцій паралельних віток спрямовані в одну сторону. У разі зміщення щіток у паралельну вітку ввійдуть секції з протилежним напрямком і сумарна ЕРС зменшиться.

Під час обертання якоря сила, що діє на провідник зі струмом, змінюється через зміну магнітної індукції в повітряному проміжку. Середнє значення сили, як і для ЕРС, можна визначити із середнього значення магнітної індукції

$$F_{con.av} = lB_{av}I_{con}. \quad (8.11)$$

Сума цих сил утворює електромагнітний момент, який діє на якір

$$T_e = \frac{d_a}{2} \sum_{k=1}^N F_{con.av,k} = \frac{d_a}{2} NlB_{av}I_{con} = \frac{d_a}{4a} NlB_{av}I_a, \quad (8.12)$$

$$\text{де } I_{con} = \frac{I_a}{2a}.$$

Визначивши з (8.9) середнє значення магнітної індукції $B_{av} = \Phi / l\tau$, а також урахувавши, що діаметр якоря дорівнює $d_a = 2p\tau / \pi$, вираз (8.12) можна записати у вигляді

$$T_e = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = c_T \Phi I_a, \quad (8.13)$$

де $c_T = \frac{pN}{2\pi a}$ – коефіцієнт моменту, який залежить від конструктивних особливостей машини.

Для того щоб напрямок електромагнітного моменту залишався незмінним, колектор здійснює комутацію струму в обмотці якоря так, що напрямок струму в тих провідниках, які розташовані під певним полюсом, завжди однаковий.

В усталеному режимі роботи момент урівноважується моментом опору навантаження, прикладеним до вала двигуна. Якщо, наприклад, зі збільшенням навантаження рівновага моментів порушиться, двигун почне зменшувати частоту обертів. Це спричинить зменшення ЕРС якоря (8.10) і збільшення його струму.

Зі збільшенням струму якоря збільшиться також обертальний момент (8.13) і рівновага моментів відновиться.

8.4. Способи збудження машин постійного струму

За способом збудження основного магнітного потоку розрізняють машини з електромагнітним збудженням, у яких збудження відбувається завдяки обмоткам головних полюсів, і машини зі збудженням від постійних магнітів. Останні зазвичай мають невелику потужність.

Характеристики МПС залежать від способу підключення кола збудження до кола якоря.

У машинах із *незалежним збудженням* обмотка збудження живиться від окремого джерела (рис. 8.6, а), тому струм збудження в ній I_f не залежить від напруги машини, а отже, і від навантаження. Таке вмикання дає змогу в широких межах регулювати струм збудження машини, але для реалізації такого типу збудження потрібне додаткове джерело живлення.

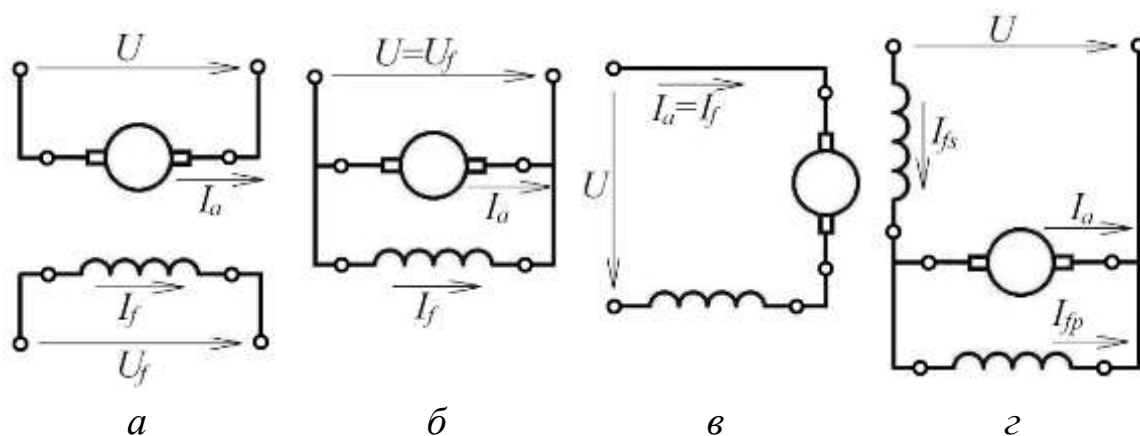


Рис. 8.6. Схеми збудження машин постійного струму

У разі *паралельного збудження* обмотка збудження підключається паралельно з обмоткою якоря (рис. 8.6, б). Такі машини не потребують додаткового джерела, що значно спрощує їх обслуговування й експлуатацію. Генератори з паралельним збудженням найчастіше використовують для отримання енергії

постійного струму, оскільки напруга таких генераторів мало залежить від навантаження.

У машинах із *послідовним збудженням* обмотка збудження підключається послідовно з обмоткою якоря (рис. 8.6, *в*) і має однаковий із нею струм. Послідовне збудження має обмежене застосування через те, що основний магнітний потік машини залежить від навантаження.

У разі *змішаного збудження* одна частина обмотки збудження підключається паралельно, а інша послідовно до обмотки якоря (рис. 8.6, *г*). Характеристики таких машин залежать від співвідношення МРС послідовної та паралельної частин обмоток.

8.5. Генераторний режим роботи МПС

Розглянемо процес перетворення механічної енергії в електричну на прикладі генератора незалежного збудження за умови, що $n = \text{const}$.

Енергія з потужністю P_1 , яка надходить до генератора від первинного двигуна, витрачається на компенсацію механічних втрат P_{mec} і магнітних втрат у сталі P_{mag} . Різниця підведеної потужності та потужності втрат становить електромагнітну потужність генератора

$$P_e = E_a I_a = P_1 - (P_{mec} + P_{mag}). \quad (8.14)$$

Корисна потужність $P_2 = U_a I_a$, яка віддається генератором у мережу, менше електромагнітної потужності на величину електричних втрат в обмотці якоря $P_{el a} = I_a^2 \sum R_a$ і втрат на щітковому контакті $P_{el b} = \Delta U_b I_a$, тобто

$$P_2 = P_e - (P_{el a} + P_{el b}) = E_a I_a - (I_a^2 \sum R_a + \Delta U_b I_a), \quad (8.15)$$

де $\sum R_a$ – опір послідовно з'єднаних обмоток, що утворюють коло якоря; ΔU_b – падіння напруги на щітках.

Відповідна енергетична діаграма генератора показана на рис. 8.7.

Скоротивши ліву і праву частини рівняння (8.15) на I_a , отримаємо рівняння рівноваги напруг генератора

$$U_a = E_a - (I_a \Sigma R_a + \Delta U_b) \quad (8.16)$$

або в спрощеному вигляді

$$E_a = U_a + I_a R_a, \quad (8.17)$$

де $I_a R_a = I_a \Sigma R_a + \Delta U_b$.

Якщо $n = \text{const}$, обертальний момент приводного двигуна T_1 урівноважується моментом холостого ходу T_o , що відповідає потужності, яку потрібно підвести до генератора для компенсації втрат холостого ходу, і гальмівним електромагнітним моментом T_e

$$T_1 = T_o + T_e, \quad (8.18)$$

де $T_o = B_m \omega + T_f$; B_m – коефіцієнт моменту в'язкого тертя; ω – кутова частота обертання якоря; T_f – момент сухого тертя.

У загальному випадку, коли $n \neq \text{const}$, $I_a \neq \text{const}$, $I_f \neq \text{const}$, рівняння електричної рівноваги для контурів генератора з незалежним збудженням мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f; \\ e_a &= u_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + R_a i_a, \end{aligned} \right\} \quad (8.19)$$

де u_f – напруга живлення обмотки збудження; $\Psi_f = L_{ff} i_f + L_{fa} i_a$ – потокозчеплення обмотки збудження; L_{ff} – повна власна індуктивність обмотки збудження; L_{fa} – взаємна індуктивність обмотки збудження і обмотки якоря; R_f – активний опір контуру обмотки збудження; $\Psi_a = L_{aa} i_a + L_{af} i_f$ – повне потокозчеплення обмоток, що утворюють контур якоря; L_{aa} – власна індуктивність

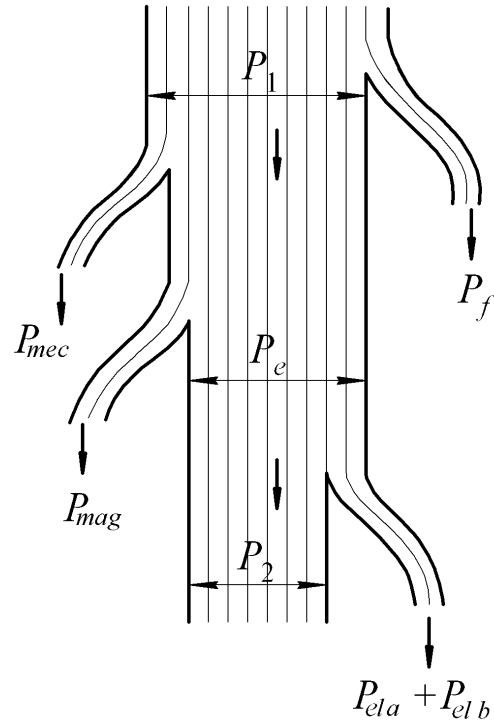


Рис. 8.7. Енергетична діаграма ГПС незалежного збудження

обмотки якоря; L_{af} – взаємна індуктивність обмотки якоря й обмотки збудження.

ЕРС обертання e_a , що входить до складу рівняння рівноваги напруг кола якоря, можна виразити через добуток потокозчеплення обмотки збудження з обмоткою якоря по поздовжній осі $\Psi_{df\ a}$ та кутової швидкості обертання якоря ω

$$e_a = \Psi_{df\ a} \omega = L_{af} i_f \omega. \quad (8.20)$$

Наведеним рівнянням відповідає схема заміщення, наведена на рис. 8.8.

Оскільки швидкість обертання якоря не є сталою, рівняння рівноваги моментів матиме вигляд

$$T_1 = T_e + B_m \omega + T_f + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (8.21)$$

де J – момент інерції якоря машини.

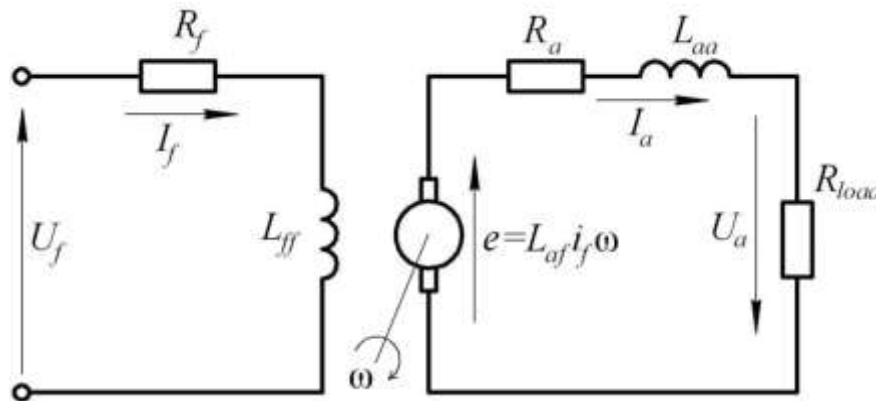


Рис. 8.8. Схема заміщення генератора з незалежним збудженням

Аналіз властивостей генераторів постійного струму здійснюється на підставі їхніх характеристик, основними з яких є характеристика холостого ходу, навантажувальна, зовнішня, регулювальна та характеристика короткого замикання.

Характеристика холостого ходу – це залежність напруги холостого ходу від струму збудження $U_o(I_f)$ за умови, що струм навантаження $I_{load} = 0$ і $n = \text{const}$. Ця характеристика повторює в певному масштабі характеристику намагнічування машини. Вона має висхідну і спадну вітки та дає змогу оцінити ступінь насичення магнітного кола генератора в номінальному режимі роботи.

Навантажувальна характеристика $U(I_f)$ отримується за допомогою регулювання струму збудження за незмінного струму навантаження $I_{load} = \text{const}$ та обертів генератора $n = \text{const}$.

Зовнішня характеристика являє собою залежність напруги генератора від струму навантаження $U(I_{load})$ за сталих значень частоти обертання та струму збудження – $n = \text{const}$, $I_f = \text{const}$. Вигляд цієї характеристики зумовлений падінням напруги на опорі обмотки якоря та реакцією якоря, яка зменшує робочий магнітний потік зі збільшенням навантаження.

Регульовальна характеристика $I_f(I_{load})$ за умови, що $U = \text{const}$, $n = \text{const}$, показує, як потрібно змінювати струм збудження для того, щоб напруга генератора залишалася сталою зі зміною струму навантаження.

У разі, коли $U = 0$ (коло якоря замкнене накоротко), регульовальна характеристика переходить у характеристику короткого замикання.

8.6. Робота МПС у режимі двигуна

Розглянемо процес перетворення енергії на прикладі двигуна з паралельним збудженням за умови, що $n = \text{const}$.

Потужність P_1 , що надходить до двигуна з мережі, дорівнює

$$P_1 = U(I_a + I_f), \quad (8.22)$$

де U – напруга на затискачах двигуна.

Частина цієї потужності витрачається на втрати в колі збудження $P_f = UI_f$, електричні втрати в обмотці якоря

$$P_{ela} = I_a^2 \sum R_a \text{ та втрати на щітковому контакті } P_{eb} = \Delta U_b I_a.$$

Залишок становить електромагнітну потужність, тобто

$$P_e = E_a I_a = U(I_a + I_f) - UI_f - (P_{ela} + P_{eb}) = UI_a - I_a^2 \sum R_a - \Delta U_b I_a. \quad (8.23)$$

Корисна механічна потужність P_2 , що віддається двигуном, менше електромагнітної потужності на величину магнітних втрат у магнітопроводі якоря P_{mag} та механічних втрат P_{mec} , тобто

$$P_2 = P_e - (P_{mag} + P_{mec}). \quad (8.24)$$

Відповідна енергетична діаграма двигуна показана на рис. 8.9.

Скоротивши ліву і праву частини рівняння (8.23) на I_a , отримаємо рівняння електричної рівноваги двигуна

$$E_a = U - (I_a \Sigma R_a + \Delta U_b), \quad (8.25)$$

яке можна записати у вигляді

$$U = E_a + I_a R_a, \quad (8.26)$$

де $I_a R_a = I_a \Sigma R_a + \Delta U_b$.

В усталеному режимі, тобто коли $n = \text{const}$, електромагнітний момент двигуна врівноважується моментом холостого ходу T_o , який відповідає втратам холостого ходу, та моментом T_{load} , що утворюється навантаженням

$$T_e = T_o + T_{load}. \quad (8.27)$$

У загальному випадку, коли $n \neq \text{const}$, $I_a \neq \text{const}$, $I_f \neq \text{const}$, рівняння електричної рівноваги для контурів двигуна з паралельним збудженням мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f; \\ u &= e_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + R_a i_a, \end{aligned} \right\} \quad (8.28)$$

де u – миттєве значення напруги живлення.

Наведеним рівнянням відповідає схема заміщення, наведена на рис. 8.10.

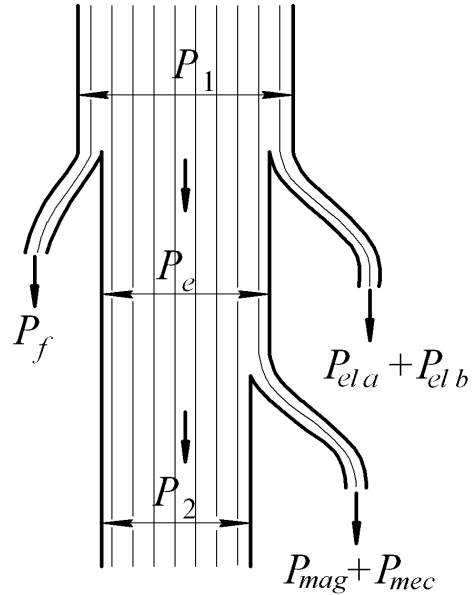


Рис. 8.9. Енергетична діаграма ДПС із паралельним збудженням

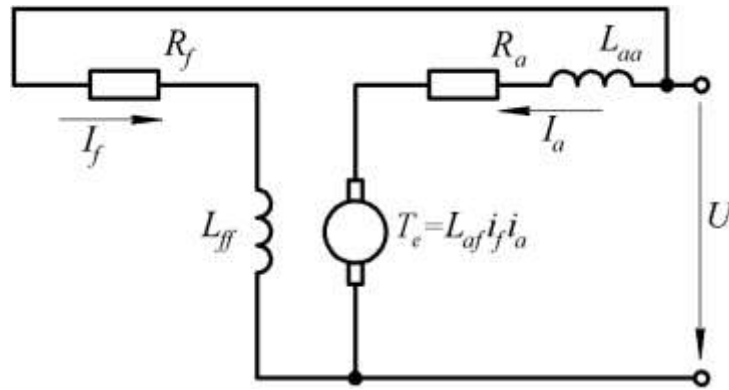


Рис. 8.10. Схема заміщення двигуна з паралельним збудженням

Оскільки швидкість обертання якоря не є сталою, рівняння рівноваги моментів (рівняння руху якоря) матиме вигляд

$$T_e = T_{load} + B_m \omega + T_f + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (8.29)$$

Рівняння (8.21, 8.29) записані для миттєвих значень відповідних моментів. Миттєве значення електромагнітного моменту машини постійного струму, незалежно від режиму роботи, можна визначити як модуль векторного добутку векторів потокозчеплення обмотки збудження з обмоткою якоря по поздовжній осі Ψ_{dfa} та струму якоря

$$T_e = |\underline{\Psi}_{dfa} \times \underline{I}_a| = \Psi_{dfa} i_a = L_{af} i_f i_a. \quad (8.30)$$

Розрізняють такі характеристики двигунів постійного струму: пускові, робочі, регульовальні та механічні.

Основні величини, що характеризують двигун під час пуску, – пусковий струм I_{fir} і пусковий момент T_{fir} . У початковий момент пуску ЕРС якоря дорівнює нулю. Тому струм якоря $I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a}$

може в багато разів перевищувати номінальний. Збільшення пускового струму призводить до збільшення пускового моменту, що може вивести двигун із ладу.

Для пуску двигуна з паралельним збудженням послідовно з якорем вмикають пусковий реостат R_1 (рис. 8.11), потрібний для того, щоб обмежити пусковий струм в якорі, доки не збільшиться ЕРС, яка пропорційна обертам якоря (8.10).

Оскільки ЕРС пропорційна також магнітному потоку Φ , під час пуску обмотку збудження включають на повну напругу мережі за повністю виведеного опору R_2 , який у подальшому використовують для регулювання обертів двигуна.

Робочі характеристики визначають експлуатаційні властивості двигунів. До них належать залежності швидкості обертання n , обертового моменту T , струму якоря I_a та ККД η від корисної потужності на валу, тобто $n(P_2)$, $T(P_2)$, $I_a(P_2)$, $\eta(P_2)$. При цьому передбачається, що напруга живлення номінальна $U = U_{nom}$, струм збудження $I_f = I_{f nom}$ та відсутній додатковий опір у колі якоря. Типові робочі характеристики ДПС із незалежним збудженням показані на рис. 8.12.

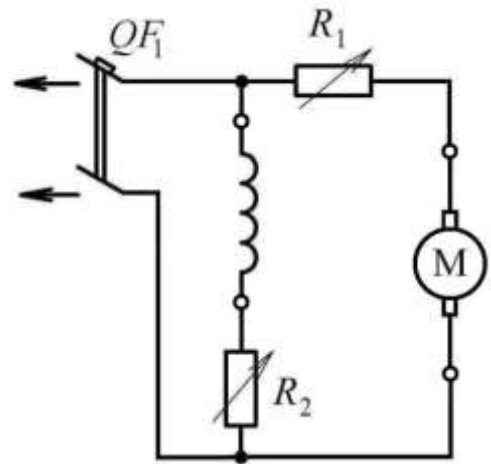


Рис. 8.11. Пуск ДПС із паралельним збудженням

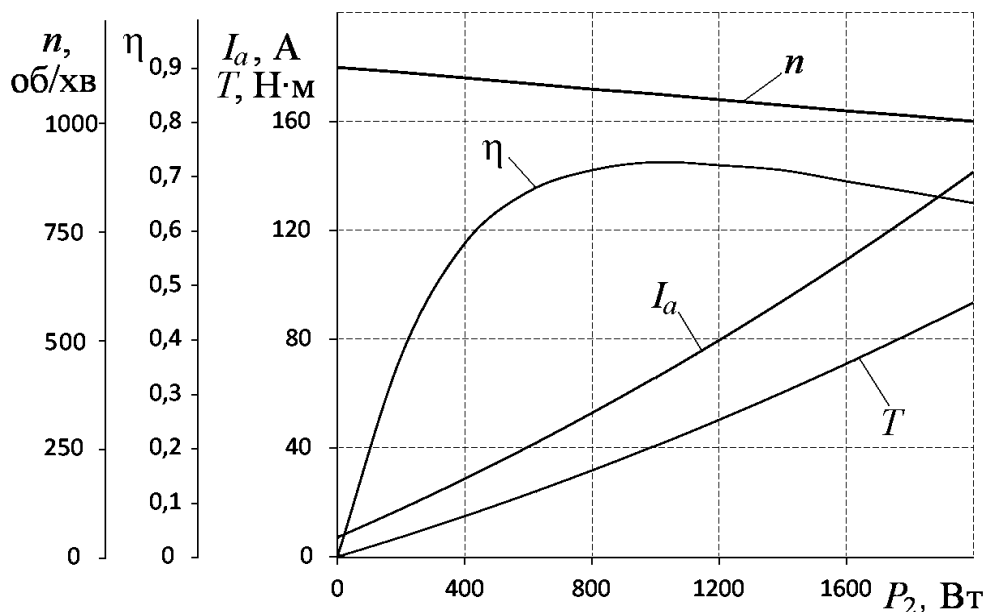


Рис. 8.12. Робочі характеристики ДПС із незалежним збудженням

Залежність швидкості обертання від струму якоря $n(I_a)$ в разі зміни навантаження на валу ДПС називається *електромеханічною (швидкісною) характеристикою* (рис. 8.13, а). Вигляд

характеристики визначається впливом двох факторів: зміною спаду напруги $I_a R_a$ (8.26) та зміною основного потоку Φ , який зменшується внаслідок реакції якоря.

Однією з найважливіших характеристик ДПС є *механічна характеристика* (рис. 8.13, б), що являє собою залежність швидкості обертання від обертового моменту на валу $n(T)$.

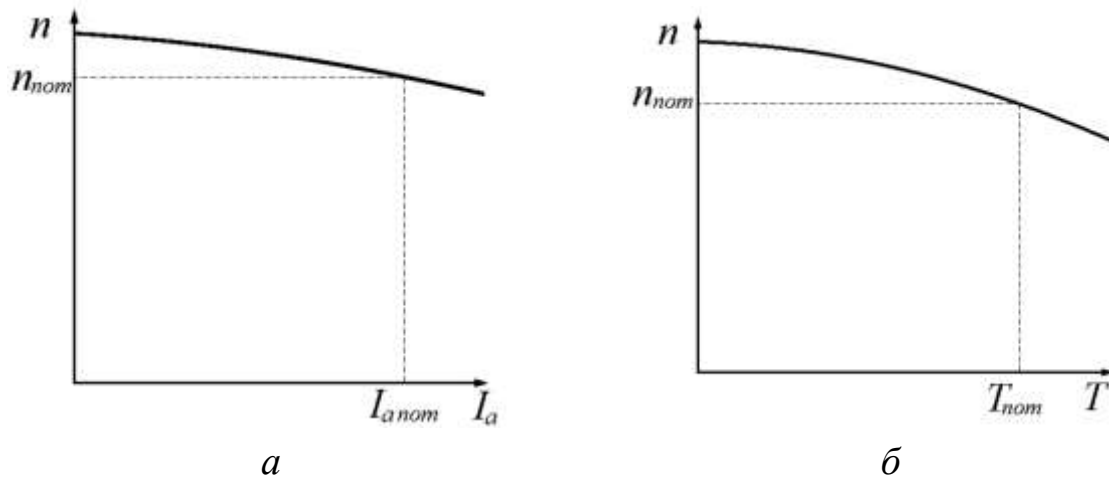


Рис. 8.13. Електромеханічна (а) і механічна (б) характеристики ДПС із незалежним збудженням

Механічна й електромеханічна характеристики називаються *природними*, якщо до двигуна підведена номінальна напруга і в його колах немає додаткових резистивних елементів. У зворотному випадку характеристики називаються *штучними*.

Відповідно до формул 8.6, 8.10

$$n = \frac{E_a}{c_E \Phi} = \frac{U_a - I_a R_a}{c_E \Phi}. \quad (8.31)$$

Звідси випливає, що швидкість обертання двигуна постійного струму можливо регулювати трьома способами: зміною напруги живлення; вмиканням додаткового опору в коло якоря та зміною потоку збудження. Останній змінюють зазвичай регулюванням струму збудження I_f .

Відповідні залежності швидкості обертання якоря $n(U_a)$, $n(R_a)$, $n(I_f)$ називають *регульовальними характеристиками*.

Запитання для самоперевірки

1. Назвіть основні частини машини постійного струму, поясніть її конструкцію.
2. Поясніть принцип дії генератора постійного струму і призначення колектора в генератора та двигуна.
3. Як можна змінити ЕРС генератора?
4. Поясніть принцип дії двигуна постійного струму.
5. Запишіть рівняння проти-ЕРС і струму якоря двигуна.
6. Виведіть рівняння обертального моменту двигуна. Як змінити напрямок обертання якоря двигуна?
7. Виведіть рівняння швидкості двигуна та поясніть способи її регулювання.
8. Поясніть призначення пускового реостата та вибір значення його опору.

Лекція 9. АСИНХРОННІ МАШИНИ

9.1. Загальні відомості

Асинхронною називається електрична машина, у якій збуджується обертове магнітне поле, але ротор обертається асинхронно, тобто з кутовою швидкістю, відмінною від кутової швидкості поля.

Явище обертового магнітного поля в сучасному його розумінні було відкрито Г. Феррарісом і Н. Теслою незалежно один від одного у 1888 р. Вони довели, що дві котушки, розташовані під прямим кутом одна до одної, у разі живлення двома синусоїдними струмами, зсунутими на 90° , утворюють обертове магнітне поле.

Асинхронні машини застосовуються переважно як двигуни. На сьогодні з множини різних типів електричних машин трифазні асинхронні двигуни (АД) із короткозамкненим ротором є найбільш поширеними. Вони виготовляються на різні потужності (від декількох ват до тисяч кіловат) і мають широке застосування в різних галузях промисловості. Одно- та двофазні двигуни зазвичай виготовляються невеликої потужності (< 500 Вт) і застосовуються в побутових приладах, електроінструменті, пристроях автоматичного керування тощо.

Асинхронні генератори використовуються переважно як автономні джерела енергопостачання. Порівняно із синхронними асинхронні генератори з короткозамкненим ротором не мають щіткового контакту, проте потребують для утворення обертового магнітного поля джерело реактивної потужності.

До переваг асинхронних машин (АМ) належать простота конструкції та невисока вартість, а також підвищена надійність.

Серед недоліків АД – складність регулювання їх експлуатаційних характеристик, значні пускові струми двигунів із короткозамкненим ротором, порівняно невисокий коефіцієнт потужності, особливо коли навантаження менше за номінальне.

9.2. Будова асинхронної машини

Основними частинами асинхронної машини є *статор* – нерухома частина і *ротор* – частина, що обертається.

Магнітопровід статора трифазної АМ являє собою полий циліндр, зібраний із листів електротехнічної сталі, які ізолювані один від одного шаром лаку (рис. 9.1, *а*). Три фазні обмотки, що утворюють обертове магнітне поле, розміщуються в пазах статора. Кожна з фазних обмоток складається із секцій, намотаних ізольованим мідним дротом, що вкладаються у відповідні пази (розподілена обмотка). Обмотка статора підключається до трифазної мережі змінного струму.

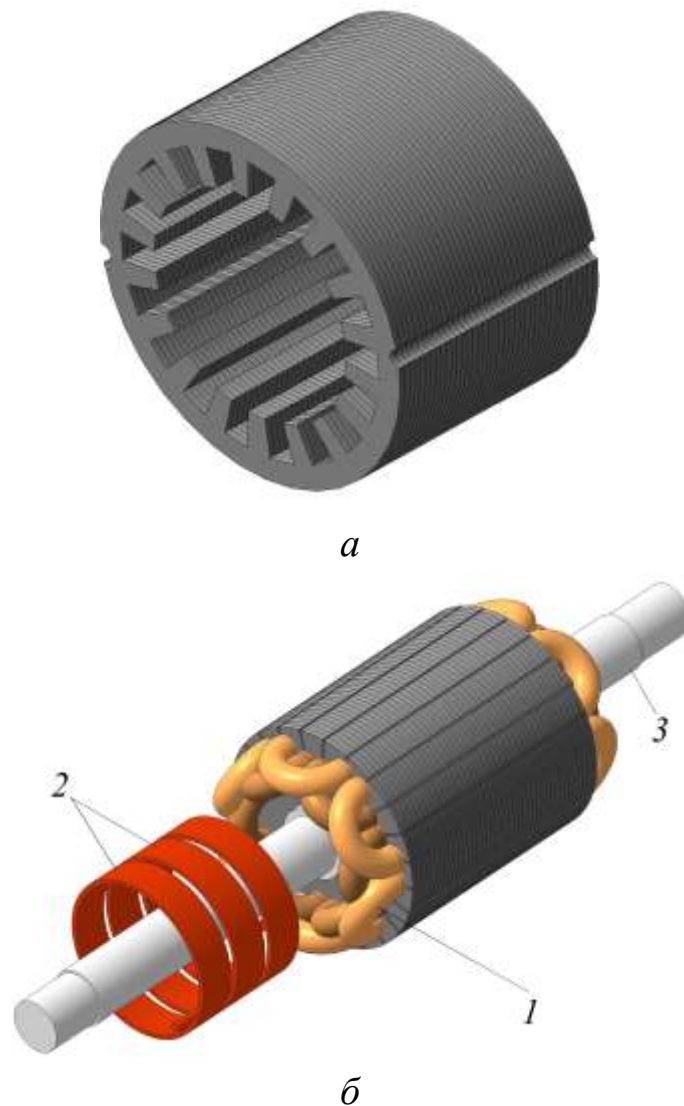


Рис. 9.1. Магнітопровід статора (*а*) і фазний ротор (*б*) асинхронної машини

Розрізняють АМ із фазним ротором або з короткозамкненим. Обмотка *фазного ротора 1* (рис. 9.1, б) виконується здебільшого трифазною, того ж типу, що й обмотка статора. Три фази ротора зазвичай з'єднуються зіркою, а вільні кінці приєднуються до трьох контактних кілець 2, що закріплені на валу 3 й ізольовані від нього. По контактних кільцях ковзають щітки (на рисунку не показані), забезпечуючи таким чином електричний контакт обмотки із зовнішнім колом. Зазвичай до обмотки ротора АД підключають трифазний реостат, за допомогою якого можна плавно регулювати швидкість обертання. Крім того, застосування реостата дає змогу суттєво покращити пускові характеристики двигуна – зменшити пусковий струм і збільшити пусковий момент.

Короткозамкнений ротор (рис. 9.2, а) складається із закріпленого на сталевому валу 1 циліндричного осердя 2, зібраного з листів електротехнічної сталі. У поздовжніх пазах ротора розміщуються стрижні обмотки, замкненні з торців струмопровідними кільцями 3.

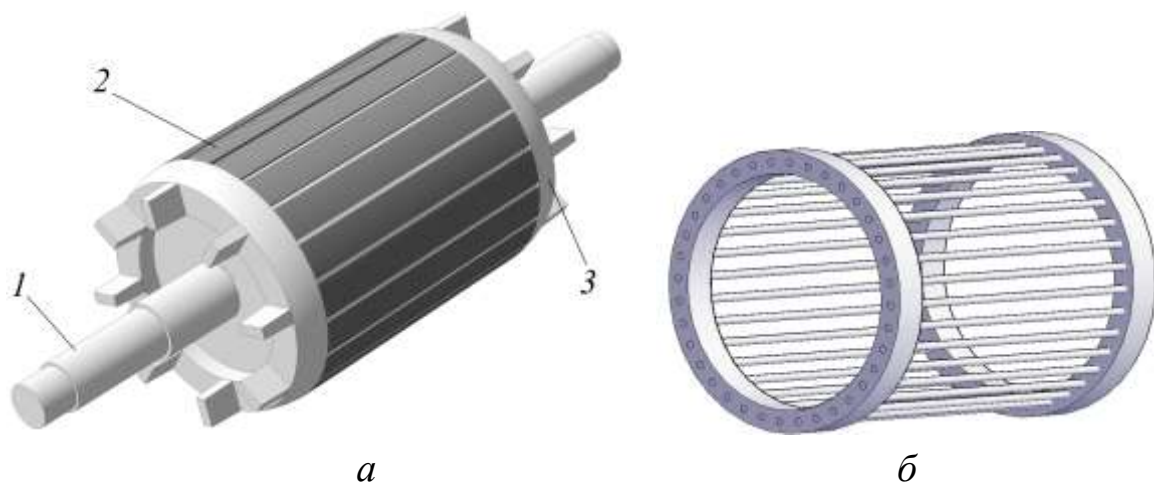


Рис. 9.2. Короткозамкнений ротор (а), обмотка біляча клітка (б)
асинхронної машини

Обмотка короткозамкненого ротора може виконуватися у вигляді одинарної білячої клітки (рис. 9.2, б), подвійної білячої клітки або глибокопазовою. Останні дві обмотки застосовують для покращення пускових характеристик АД.

В обох типах машин вал ротора опирається на підшипники, які розміщуються в підшипникових щитах, з'єднаних зі статором. У разі роботи в режимі двигуна до вала приєднується навантаження, а в режимі генератора – первинний двигун.

9.3. Принцип дії асинхронної машини

З подачею на обмотки статора трифазної напруги в них почнуть протікати струми, які утворюють фазні магнітні поля. Завдяки тому, що просторові осі фазних обмоток зсунуті одна відносно одної на 120° (електричних), а фази струмів обмоток відрізняються на одну третю періоду, результуюче магнітне поле статора, залишаючись незмінним за амплітудою, обертається з частотою (об/хв)

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (9.1)$$

де f_1 – частота напруг і струмів в обмотці статора; p – кількість пар полюсів обмотки.

На рис. 9.3 показано розподіл по пазах трифазної обмотки статора асинхронної машини з кількістю пар полюсів $p = 2$.

Тут кожна з трьох фазних обмоток складається з двох груп котушок, тобто A_1-X_1 , A_2-X_2 – відповідно перша та друга котушкова група фази A і т. д. За наведеної на рис. 9.4 послідовності чергування фаз струмів обмоток (пряма послідовність) магнітне поле статора обертатиметься за годинниковою стрілкою.

На рис. 9.5 показано картини магнітного поля в перетині двигуна в моменти часу t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , з яких видно, що за повний період зміни струму, магнітне поле статора обертається на 180 геометричних градусів. Очевидно, як випливає з (9.1), частота обертання поля в цьому разі в два рази менша за частоту струму живлення.

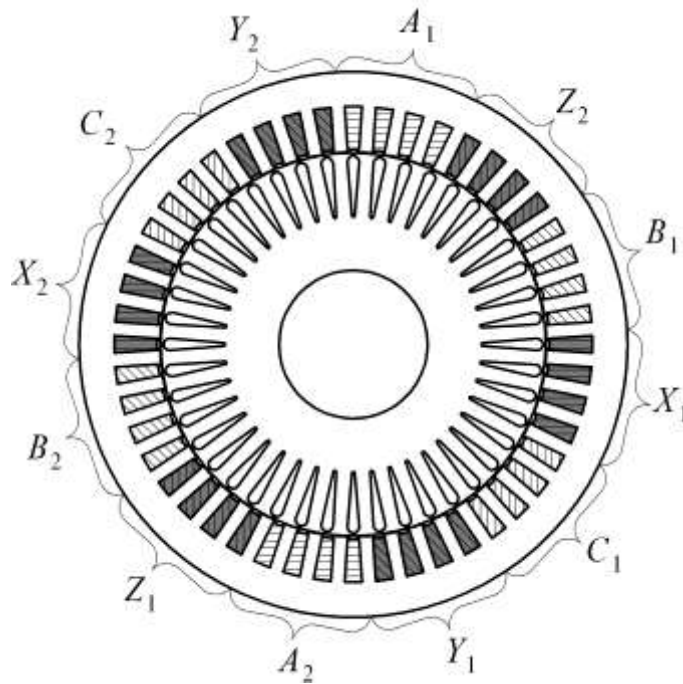


Рис. 9.3. Розташування обмоток трифазної АМ з кількістю полюсів $2p = 4$

Унаслідок обертання магнітного поля у фазній обмотці статора, згідно із законом електромагнітної індукції, наводиться ЕРС, діюче значення якої визначиться виразом

$$E_s = 4,44 f_1 w_s \Phi_m K_{ws}, \quad (9.2)$$

де w_s – кількість витків фазної обмотки статора; Φ_m – амплітудне значення потоку обертового магнітного поля; K_{ws} – обмотковий коефіцієнт статорної обмотки, причому $K_{ws} \leq 1$.

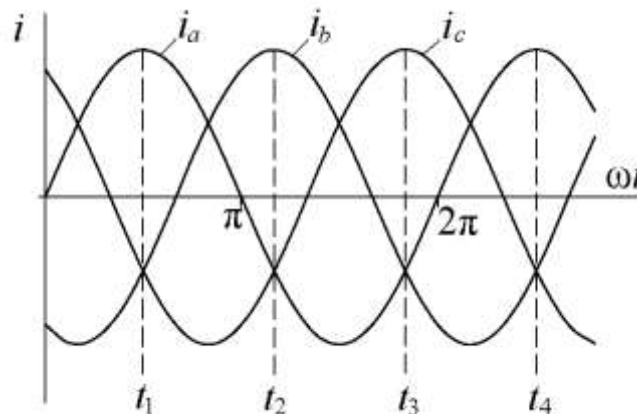


Рис. 9.4. Графіки миттєвих значень струмів у фазних обмотках статора

Зазвичай значення обмоткового коефіцієнта для асинхронних машин лежить у межах 0,92–0,96.

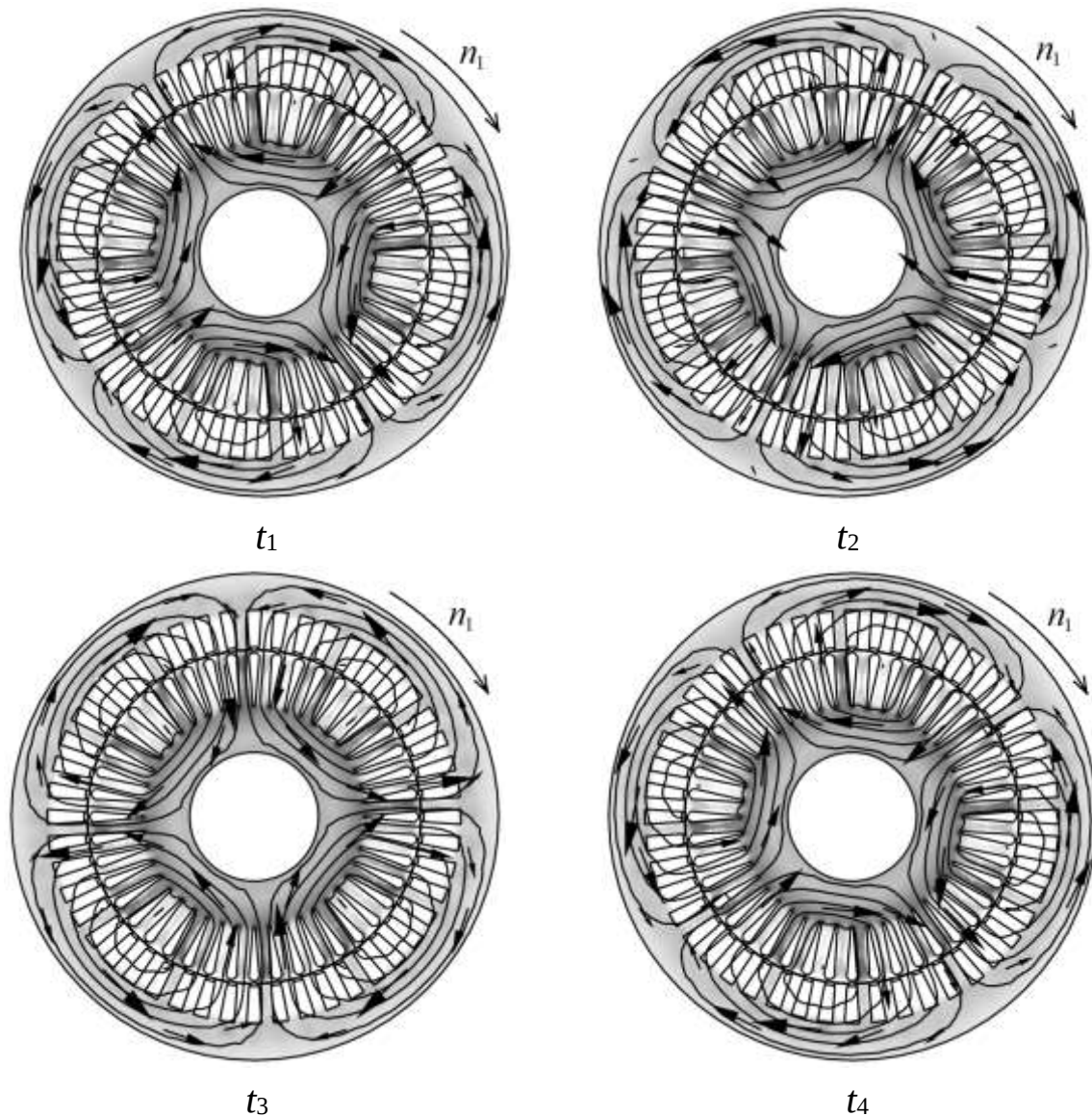


Рис. 9.5. Розподіл магнітного поля в перетині чотирьопольового асинхронного двигуна в різні моменти часу: стрілки – вектор магнітної індукції; колір та ізолінії – векторний магнітний потенціал

Обертове магнітне поле статора індукує ЕРС також в обмотці ротора, яку можна визначити з таких міркувань. Під час роботи АМ ротор обертається з частотою обертання, що відрізняється від частоти обертання магнітного поля. Відмінність частоти обертання ротора ω_r від частоти обертання магнітного поля статора ω_1 характеризують *ковзанням*, яке визначається відношенням

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_r}{n_1}. \quad (9.3)$$

Тоді частоту ковзання можна визначити за формулою

$$f_2 = f_1 s, \quad (9.4)$$

а діюче значення ЕРС ротора дорівнюватиме

$$E_r = 4,44 f_2 w_r \Phi_m K_{Wr}, \quad (9.5)$$

де f_2 – частота ЕРС, що індукується у роторі (частота ковзання); w_r – кількість витків фазної обмотки ротора; K_{Wr} – обмотковий коефіцієнт обмотки ротора.

У разі, якщо ротор короткозамкнений, вважають, що число фаз ротора m_2 дорівнює числу стрижнів N , тоді $w_r = \frac{1}{2}$, а $K_{Wr} = 1$.

Під дією індукованих ЕРС у фазних обмотках ротора протікають струми, взаємодія яких з обертовим магнітним полем статора спричиняє виникнення обертового моменту, що приводить ротор у рух.

Із формул (9.3–9.5) видно, що чим швидше обертається ротор, тим менша індукується ЕРС, а отже, і менші струми протікають у його фазних обмотках. Із цієї причини ротор не може обертатися синхронно з полем, оскільки в такому разі ЕРС обмотки дорівнюватиме нулю. Ковзання в разі роботи АМ в режимі двигуна перебуває в межах $0 < s < 1$. За номінального навантаження для двигунів нормального виконання цей показник перебуває в межах 0,01–0,06.

Якщо за допомогою іншого двигуна частоту обертання ротора збільшити до частоти, що перевищує частоту обертання поля $n_r > n_1$, то АМ перейде до *генераторного режиму* роботи. У цьому режимі знак обертового моменту T змінюється на протилежний і він стає гальмівним. Таким чином машина, отримуючи механічну енергію від первинного двигуна, перетворює її в електричну. Для генераторного режиму, як випливає з (9.3), $s < 0$.

У разі, коли ротор АМ обертається протилежно до напрямку обертання магнітного поля ($s > 1$), обертовий момент машини буде спрямований проти руху ротора і гальмуватиме його. Тому

такий режим роботи називається режимом *електромагнітного гальма*. У цьому разі в машині розсіюється значна кількість енергії, що спричиняє швидке її нагрівання, і такий режим (*гальмування противмиканням*) застосовується короткочасно, наприклад для швидкої зупинки двигуна.

9.4. Схема заміщення асинхронної машини

Під час роботи АМ частота струмів ротора, яка залежить від ковзання, відрізняється від частоти струмів статора. Для спрощення математичного опису електромагнітних процесів реальну машину з обертовим ротором замінюють на еквівалентну, з погляду електромагнітних та енергетичних співвідношень, машину з нерухомим ротором. У такому разі АМ можна розглядати як трансформатор з обертовим магнітним полем.

Для здійснення такої заміни реальну обмотку ротора із числом фаз m_2 і кількістю витків w_2 замінюють *приведеною обмоткою* з числом фаз m_1 і кількістю витків w_1 статора. Параметри приведеної обмотки визначаються за умови незмінності магнітного поля та процесів перетворення енергії машини.

Формули для приведення обмотки ротора до обмотки статора, за аналогією з трансформатором, матимуть вигляд:

приведений струм ротора

$$I'_r = K_I I_r, \quad (9.6)$$

де $K_I = \frac{m_2 w_r k_{Wr}}{m_1 w_s k_{Ws}}$ – коефіцієнт приведення струму;

приведена ЕРС ротора

$$E'_r = K_E E_r, \quad (9.7)$$

де $K_E = \frac{w_s k_{Ws}}{w_r k_{Wr}}$ – коефіцієнт приведення ЕРС;

приведені опори ротора

$$R'_r = K R_r; \quad X'_{lr} = K X_{lr}; \quad Z'_r = K Z_r, \quad (9.8)$$

де $K = K_E K_I$ – коефіцієнт приведення опорів; R_r , X_{lr} , Z_r – відповідно активний опір, опір розсіювання та повний опір обмотки ротора.

Подібність математичного опису асинхронної машини з трансформатором дає змогу використати схему заміщення останнього за умови, що механічна потужність асинхронної машини буде представлена рівною їй електричною потужністю. Для цього в коло обмотки ротора схеми заміщення вводять додатковий опір, значення якого визначають із таких міркувань.

Струм ротора для будь-якого значення ковзання дорівнює

$$I_r = \frac{sE_r}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{lr})^2}}. \quad (9.9)$$

У виразі (9.9) вважається, що активний опір обмотки ротора не залежить від ефекту витіснення струму $R_r = \text{const}$, а індуктивний опір розсіювання є функцією ковзання

$$x_{lr} = 2\pi f_2 L_{lr} = 2\pi f_1 s L_{lr} = sX_{lr}, \quad (9.10)$$

де L_{lr} – індуктивність розсіювання обмотки ротора.

Поділивши чисельник і знаменник правої частини виразу (9.9) на s , отримаємо

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{lr}^2}}. \quad (9.11)$$

З урахуванням останнього виразу схему заміщення кола ротора АМ можна представити у вигляді послідовно з'єднаних індуктивного опору розсіювання X_{lr} , що не залежить від ковзання, та активного опору R_r/s , який залежить від ковзання. Причому останній можна записати як суму двох складників

$$\frac{R_r}{s} = R_r + R_r \frac{1-s}{s}, \quad (9.12)$$

де перший складник R_r є дійсним опором ротора, а другий $R_r \frac{1-s}{s}$ – додатковий опір, який враховує відмінність ЕРС рухомого та нерухомого ротора.

Якщо знехтувати втратами в магнітопроводах статора і ротора, то схема заміщення АМ матиме вигляд, показаний на рис. 9.6, а.

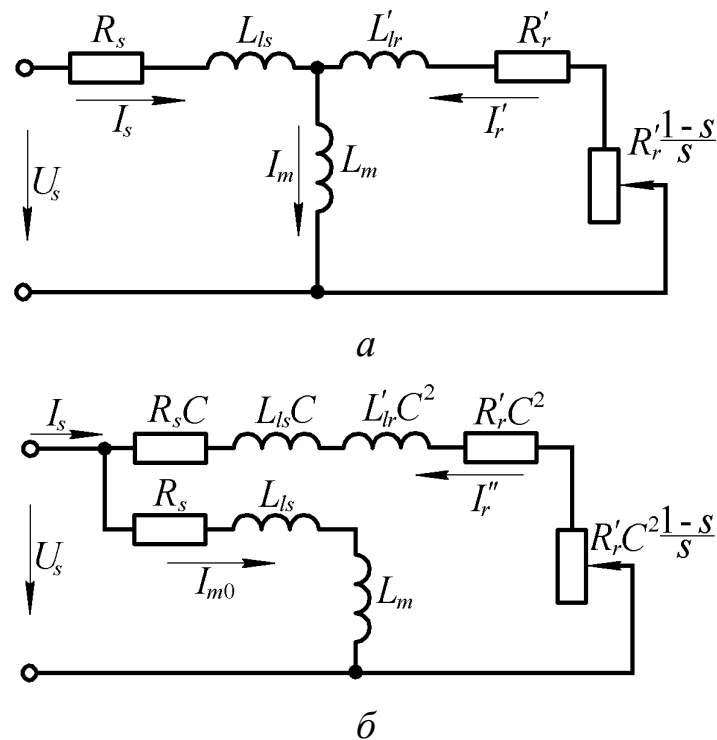


Рис. 9.6. Схеми заміщення асинхронної машини

Наявність трьох віток у приведеній Т-подібній схемі заміщення в деяких випадках ускладнює розрахунок та аналіз машини. Крім того, навіть за умови $U_s = \text{const}$ напруга вітки контуру намагнічування в такій схемі не є сталою. Більш зручною для розрахунку є Г-подібна схема заміщення, у якій контур намагнічування підключений до напруги живлення статора U_s .

Для того щоб значення струму намагнічування I_m у новій схемі залишалося незмінним, у відповідний контур вмикають послідовно з'єднані елементи R_s , L_{ls} . При цьому в контурі намагнічування протікає фіктивний струм I_{m0} , який залишається сталим під час зміни ковзання s .

Для Г-подібної схеми вираз (9.11) для струму ротора запишеться у вигляді

$$I_r'' = \frac{U_s}{\sqrt{\left(CR_s + C^2 \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \left(CX_{ls} + C^2 X_{lr}'\right)^2}}, \quad (9.13)$$

причому $I_r' = CI_r''$.

Коефіцієнт C , який враховує заміну Т-подібної схеми заміщення Г-подібною, загалом є комплексним, оскільки він повинен враховувати компенсацію струмів не тільки за значенням, але й за фазою. Проте для асинхронних двигунів загального призначення уявною частиною (через її невелике значення) зазвичай нехтують. На практиці враховують тільки дійсну частину, яку наближено можна визначити з виразу

$$C \approx 1 + \frac{L_{ls}}{L_m}. \quad (9.14)$$

Для машин загального призначення значення цього коефіцієнта перебуває в межах $C = 1,01\text{--}1,08$.

9.5. Енергетичні діаграми асинхронної машини

Під час роботи АМ у режимі двигуна відбувається перетворення електричної енергії, що надходить із мережі, в механічну енергію обертання ротора разом із навантаженням.

Корисна потужність P_2 , що надходить до навантаження, менша за споживану P_1 на значення втрат, які поділяються на електричні, магнітні та механічні.

Електричні втрати – це втрати в провідниках обмоток статора і ротора, на перехідному опорі між щітками та контактними кільцями.

Потужність механічних втрат складається з втрат на тертя в підшипниках і щітках, втрат на охолодження машини тощо.

Активна потужність споживання енергії з мережі дорівнює

$$P_1 = 3U_s I_s \cos \varphi_1, \quad (9.15)$$

де U_s – фазна напруга статора; I_s – фазний струм статора; φ_1 – кут зсуву фаз між струмом і напругою статора. Частина цієї

потужності витрачається на електричні втрати в обмотці статора P_{els} , інша частина утворює потужність обертового магнітного поля P_{fd} . Електромагнітна потужність P_e менша за потужність обертового магнітного поля на величину магнітних втрат (від вихрових струмів та гістерезису) P_{mag} , тобто $P_e = P_{fd} - P_{mag}$. На практиці враховують тільки втрати в осерді статора, оскільки частота перемагнічування сталі в роторі в номінальному режимі роботи досить невелика (1–3 Гц) і магнітні втрати незначні.

Унаслідок протікання струмів в обмотці ротора в ній виникають електричні втрати P_{elr} . Механічна потужність двигуна визначається таким виразом $P_m = P_e - P_{elr}$. Нарешті, корисна потужність, що віддається двигуном P_2 , менше за механічну потужність на сумарну потужність механічних P_{mec} і додаткових P_{ad} втрат $P_2 = P_m - P_{mec} - P_{ad}$.

Енергетичну діаграму АД, що відповідає наведеним рівнянням, наведено на рис. 9.7, а.

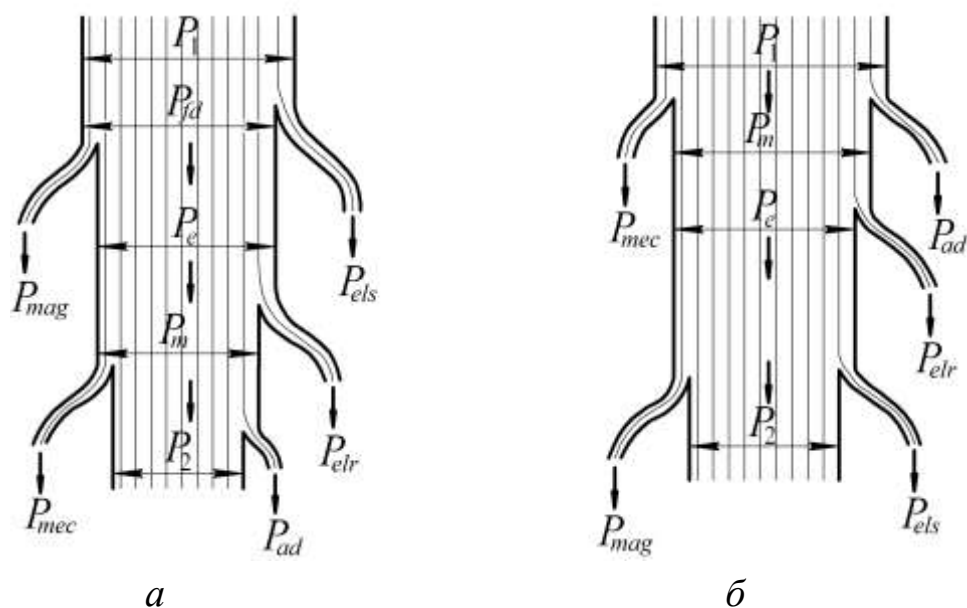


Рис. 9.7. Енергетичні діаграми асинхронної машини

Основною енергетичною характеристикою АД є ККД, який визначається відношенням корисної потужності на валу P_2 до активної потужності споживання P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (9.16)$$

У генераторному режимі роботи до вала АМ підводиться механічна потужність P_1 . Різниця підведеної механічної потужності та потужностей механічних P_{mec} і додаткових P_{ad} втрат становить механічну потужність генератора $P_m = P_1 - P_{mec} - P_{ad}$.

Електромагнітна потужність менша за механічну на значення електричних втрат в обмотці ротора P_{elr} . Корисна потужність, що віддається генератором у мережу P_2 , дорівнює різниці електромагнітної потужності та потужностей магнітних P_{mag} і електричних P_{els} втрат у статорі, тобто $P_2 = P_e - P_{mag} - P_{els}$.

Відповідну енергетичну діаграму генератора наведено на рис. 9.7, б.

ККД генератора визначається виразом (9.16), у якому P_1 – підведена механічна потужність, а P_2 – електрична потужність, що віддається в мережу.

9.6. Обертальний момент асинхронної машини

В усталеному режимі роботи (коли $\omega_r = \text{const}$) електромагнітний момент АД T_e урівноважується моментом холостого ходу T_o та моментом опору навантаження T_{load}

$$T_e = T_o + T_{load}, \quad (9.17)$$

$$\text{де } T_e = \frac{P_e}{\omega_1}; \quad T_{load} = \frac{P_2}{\omega_r}; \quad \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad - \quad \text{кутова швидкість}$$

обертання магнітного поля.

Кутові швидкості магнітного поля та ротора пов'язані між собою через ковзання. З виразу 9.3

$$\omega_r = \omega_1(1 - s). \quad (9.18)$$

З енергетичної діаграми двигуна (рис. 9.7, а) електричні втрати потужності в обмотці ротора дорівнюють

$$P_{elr} = P_e - P_m = T_e \omega_1 - T_e \omega_r. \quad (9.19)$$

Активну потужність ротора також можна визначити з виразу

$$P_{elr} = m_2 E_r I_r \cos \psi_2, \quad (9.20)$$

де I_r – струм ротора; ψ_2 – кут зсуву фаз між ЕРС і струмом ротора.

Визначивши з (9.19) електромагнітний момент T_e , і враховуючи (9.18, 9.20), отримаємо

$$T_e = \frac{m_2 E_r I_r \cos \psi_2}{\omega_1 - \omega_r} = \frac{m_2 E_r I_r \cos \psi_2}{\omega_1 s}. \quad (9.21)$$

Підставивши в (9.21) значення ЕРС ротора $E_r = \frac{2\pi f_1 s \Phi_m w_r K_{Wr}}{\sqrt{2}}$, маємо

$$T_e = \frac{m_2 2\pi f_1 s \Phi_m w_r K_{Wr} I_r \cos \psi_2}{\frac{2\pi f_1 s}{p}} = \frac{1}{\sqrt{2}} m_2 p w_r K_{Wr} \Phi_m I_r \cos \psi_2 \quad (9.22)$$

або

$$T_e = \text{const} \Phi_m I_r \cos \psi_2, \quad (9.23)$$

тобто обертальний момент асинхронної машини пропорційний добутку потоку обертового магнітного поля і струму в обмотці ротора.

Згідно зі схемою заміщення, наведеною на рис. 9.6, електромагнітній потужності відповідає потужність на активному опорі ротора $\frac{R'_r}{s}$

$$P_e = m_2 I_r^2 \frac{R_r}{s} = m_1 I_r'^2 \frac{R'_r}{s}. \quad (9.24)$$

З виразу 9.13 приведений струм ротора дорівнює

$$I'_r = C I_r'' = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + C \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{ls} + C X'_{lr})^2}}. \quad (9.25)$$

Підставивши в (9.24) значення струму з (9.25), отримаємо залежність електромагнітної потужності від напруги U_s , ковзання s та параметрів машини

$$P_e = \frac{m_1 U_s^2 \frac{R'_r}{s}}{\left(R_s + C \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_{ls} + C X'_{lr})^2}. \quad (9.26)$$

З останнього виразу електромагнітний момент визначиться як

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_1} = \frac{P_e p}{2\pi f_1} = \frac{pm_1 U_s^2 \frac{R'_r}{s}}{2\pi f_1 \left(\left(R_s + C \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_{ls} + C X'_{lr})^2 \right)}, \quad (9.27)$$

тобто обертальний момент АМ пропорційний до квадрата напруги, що підводиться до статора. Це означає, що асинхронні двигуни досить чутливі до зниження напруги живлення.

Вирази (9.22, 9.27) для моменту дійсні в усіх режимах роботи асинхронної машини: двигуна, генератора чи електромагнітного гальма. Характерний графік залежності електромагнітного моменту T_e від ковзання s зображено на рис. 9.8. З переходом до генераторного режиму ковзання змінює знак $s < 0$ і електромагнітний момент також стає від'ємним, тобто гальмівним. Крива моменту під час роботи в режимі електромагнітного гальма $s > 1$ являє собою продовження кривої моменту двигуна.

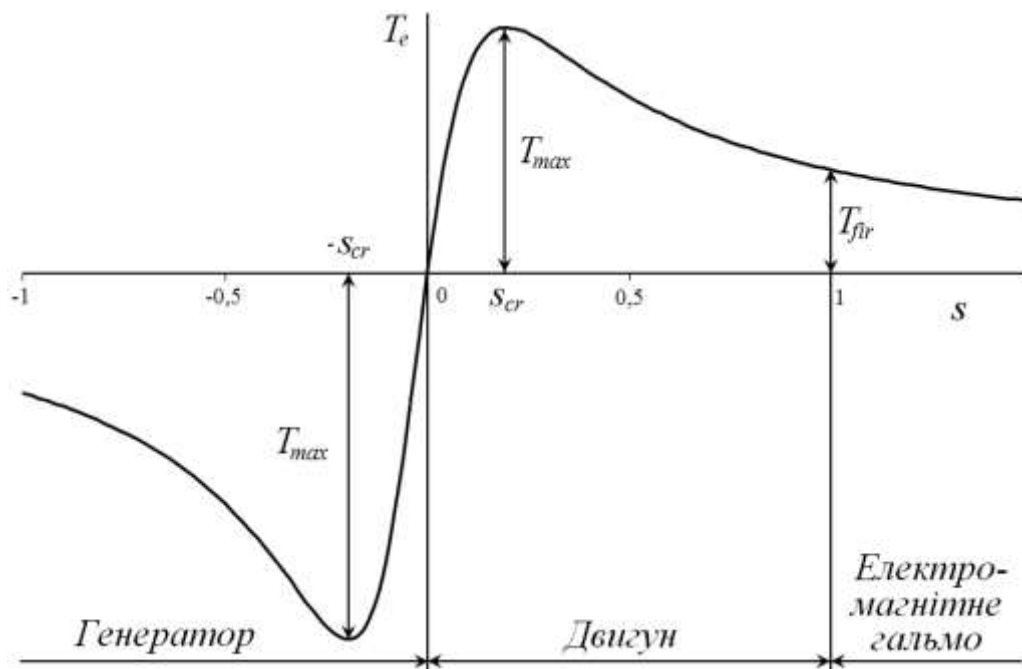


Рис. 9.8. Залежність $T_e(s)$ асинхронної машини

Як видно з рис. 9.8, крива моменту має максимуми, що відповідають певному значенню ковзання, яке називають *критичним ковзанням* s_{cr} . Для визначення ковзання, за якого момент буде максимальним T_{max} , потрібно прирівняти до нуля похідну від виразу (9.27) за ковзанням $\frac{dT_e}{ds} = 0$ і з отриманого рівняння визначити $s = s_{cr}$. Опустивши математичні викладки, запишемо вираз для критичного ковзання

$$s_{cr} = \pm \frac{CR'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + CX'_{lr})^2}}, \quad (9.28)$$

де знак «плюс» відповідає режиму роботи машини двигуном, «мінус» – генератором.

Підставивши (9.28) у вираз для електромагнітного моменту (9.27), отримаємо максимальний момент, який для режиму двигуна запишеться

$$T_{max} = \frac{pm_1 U_s^2}{4\pi f_1 C \left(R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + CX'_{lr})^2} \right)}. \quad (9.29)$$

Максимальний момент визначає перевантажувальну здатність двигуна. Для двигунів загального призначення $T_{max} = (1,6-2,5)T_{nom}$, де T_{nom} – номінальний момент.

Поряд із максимальним моментом важливою характеристикою АД також є пусковий момент T_{fir} , який можна визначити, підставивши в (9.27) значення ковзання $s = 1$, тоді

$$T_{fir} = \frac{pm_1 U_s^2 R'_r}{2\pi f_1 \left((R_s + CR'_r)^2 + (X_{ls} + CX'_{lr})^2 \right)}. \quad (9.30)$$

Вирази (9.29, 9.30) свідчать, що максимальний момент АМ не залежить від активного опору ротора, а пусковий момент залежить. Зі збільшенням активного опору ротора максимальний момент зміщується в ділянку більших ковзань, що ілюструє рис. 9.9. При цьому спостерігається збільшення пускового моменту та, як впливає зі схеми заміщення (рис. 9.6), зменшення пускового струму. Цю властивість застосовують в АД із фазним ротором для

покращення їх пускових характеристик, а також регулювання швидкості обертання.

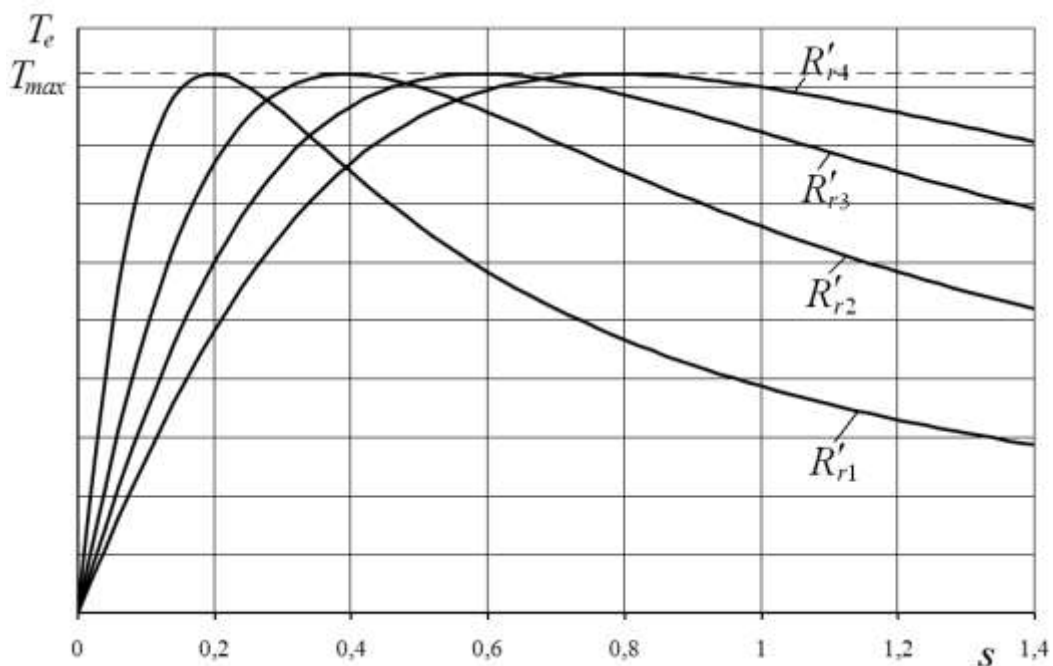


Рис. 9.9. Залежність $T_e(s)$ за різних значень опору ротора R'_r

9.7. Характеристики асинхронних двигунів

Для оцінки властивостей двигуна як елемента електропривода використовують *механічну характеристику*, що являє собою залежність кутової швидкості обертання ротора від моменту навантаження на валу $\omega_r(T_{load})$ (рис. 9.10). Унаслідок лінійної залежності між ковзанням s і швидкістю обертання ротора ω_r (вираз 9.3), а також через те, що момент холостого ходу $T_o \ll T_e$, вигляд цієї характеристики відрізняється від наведеної на рис. 9.8 характеристики $T_e(s)$ тільки положенням стосовно координатних осей.

Як видно з рис. 9.10, зі збільшенням моменту навантаження T_{load} від нуля до максимального значення T_{max} кутова швидкість ротора зменшується до критичної $\omega_{cr} = \omega_1(1 - s_{cr})$ і механічна характеристика досить жорстка. У разі перевантаження понад

максимального моменту характеристика має ділянку, що відповідає нестійкому режиму роботи двигуна (розгін або гальмування).

Механічна характеристика, отримана за нормальних умов роботи двигуна, називається *природною*, на відміну від *штучної* механічної характеристики, яка буде в разі, наприклад, вмикання в коло фазного ротора реостата.

Залежності кутової швидкості обертання ротора ω_r , обертового моменту T , коефіцієнта потужності $\cos\phi_1$, ККД η , потужності споживання P_1 , струму статора I_s та ковзання s від корисної потужності на валу P_2 називають *робочими характеристиками* двигуна. Усі робочі характеристики отримуються за номінальної частоти та напруги живлення. Типові робочі характеристики АД зазначені на рис. 9.11.

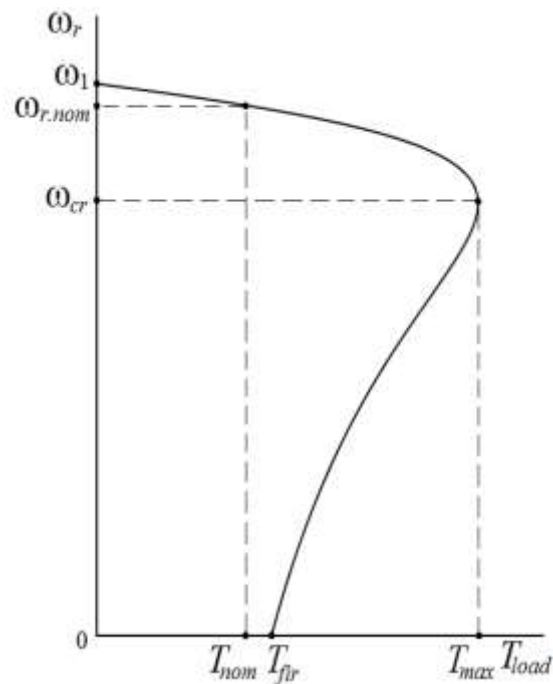


Рис. 9.10. Механічна характеристика АД

Як видно з рисунка, зі збільшенням навантаження швидкість обертання ротора незначно зменшується (у межах кількох відсотків), тобто АД має досить жорстку характеристику $\omega_r(P_2)$.

Обертальний момент T зростає пропорційно до навантаження практично лінійно, оскільки $T = \frac{P_2}{\omega_r}$. Деякий вигин спричинений зміною швидкості обертання ротора.

Крива коефіцієнта потужності починається зі значення $\cos\phi_1$ холостого ходу. Вигляд цієї характеристики залежить від співвідношення активної та реактивної потужностей двигуна. Остання практично не залежить від навантаження, тому в режимі холостому ходу коефіцієнт потужності АД досить низький.

Активна потужність зростає разом із навантаженням, зумовлюючи збільшення коефіцієнта потужності.

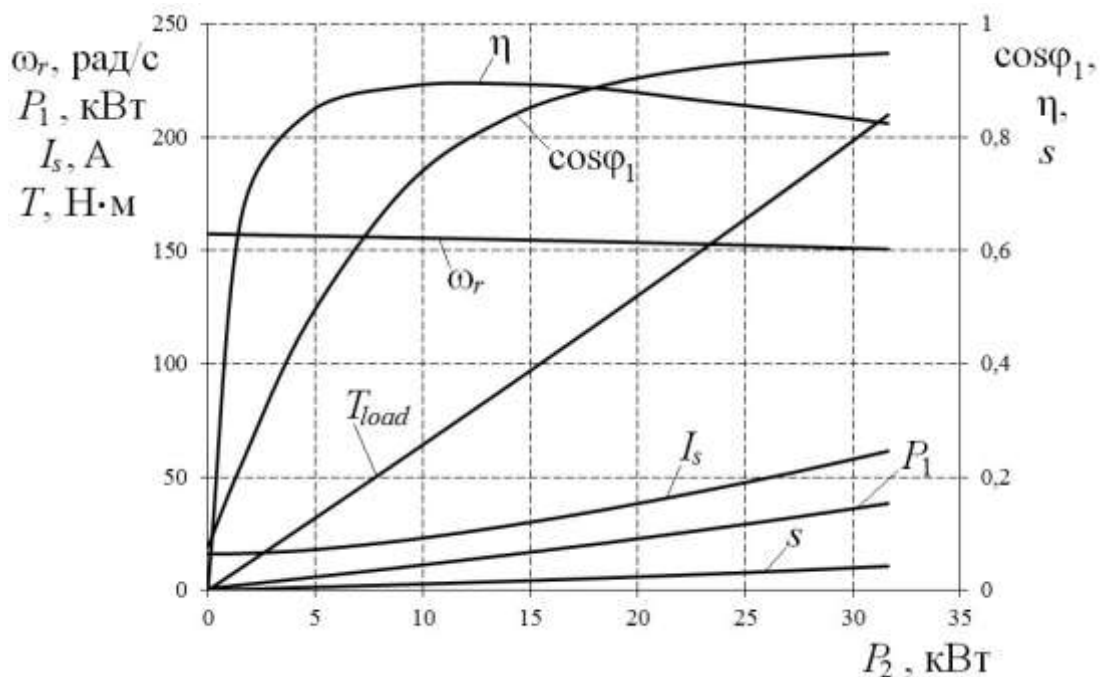


Рис. 9.11. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Максимальне значення ККД спостерігається, коли постійні втрати (P_{mag} , P_{mec}) дорівнюють змінним втратам (P_{el}). Оскільки АД здебільшого працюють недовантаженими, їх проєктують таким чином, щоб ця характеристика мала максимум за навантаження близько 75 % від номінального.

Запитання для самоперевірки

1. Як виконують магнітопровід АД?
2. Поясніть принцип виконання обмотки статора АД.
3. Як виконують обмотку короткозамкненого ротора?
4. Поясніть будову обмотки ротора двигуна з контактними кільцями.
5. Від чого залежить швидкість обертання магнітного поля?
Чим визначається кількість пар полюсів двигуна?

6. Як утворюється обертальний момент АД? Чому ротор не може самостійно досягти синхронної швидкості обертання?
7. Як визначають ковзання і швидкість обертання ротора і як впливає на АД зміна навантаження на валу?
8. Що розуміють під механічною характеристикою і який вигляд механічної характеристики АД?
9. Як визначають діючі значення фазних ЕРС статора і ротора?
10. Як залежать ЕРС ротора й частота його струму від ковзання?
11. Які види втрат потужності наявні в АД? Що розуміють під електромагнітною і механічною потужністю двигуна?
12. Від чого залежить обертальний момент двигуна?
13. Поясніть умову усталеної роботи двигуна.
14. Від чого і як залежить критичний момент і критичне ковзання?
15. За якими показниками оцінюють пускові властивості двигуна?
16. Що розуміють під робочими характеристиками двигуна? Поясніть характер цих залежностей для АД.
17. Умова переходу асинхронної машини до генераторного режиму. Поясніть практичне значення такого режиму.

Лекція 10. СИНХРОННІ МАШИНИ

10.1. Загальні відомості

Синхронна машина (СМ) – це машина змінного струму, швидкість обертання ротора якої пропорційна частоті мережі і не залежить від навантаження. У машинах прямого виконання (з обмоткою змінного струму на статорі) ротор обертається синхронно з частотою обертового магнітного поля статора.

СМ є оборотними, тобто можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Проте найбільшого поширення набули синхронні генератори (СГ), які на сьогодні є основним типом перетворювачів механічної енергії в електричну, що застосовуються під час виробництва енергії на електростанціях.

Залежно від типу первинного двигуна розрізняють *гідрогенератори* (первинний двигун – гідравлічна турбіна), *турбогенератори* (первинний двигун – парова турбіна), *дизель-генератори* (первинний двигун – дизель).

Як двигуни, СМ найчастіше використовують у приводах потужних (> 100 кВт) компресорів, насосів, прокатних станів, холодильних установок, дробарок тощо.

Основними перевагами синхронних двигунів (СД) є постійна швидкість обертання, яка не залежить від навантаження, менша чутливість до перепадів напруги живлення, а також можливість роботи з випереджальним струмом. Останню властивість застосовують для генерування реактивної потужності за допомогою *синхронних компенсаторів* – машин, призначених виключно для компенсації реактивної потужності.

До недоліків СМ належать складність конструкції, наявність нестійких режимів роботи, потреба у джерелі постійного струму, складність запуску СД.

10.2. Принцип дії та будова синхронної машини

Принцип дії синхронного генератора пояснено в лекції 3 на прикладі найпростішої конструкції, у якій один виток у вигляді рамки обертається в магнітному полі між двома магнітами (рис. 3.1).

Сучасні синхронні генератори виготовляють на напруги 18 кВ і вище та потужністю до 1200 МВт. За таких умов наявність ковзного контакту в колі ротора суттєво знижує надійність машини. Для виключення цього недоліку обмотку змінного струму розміщують на статорі, а полюсну систему з обмоткою збудження – на роторі машини. Обмотка збудження в такому разі живиться постійним струмом через контактні кільця. При цьому ковзний контакт перебуває в колі збудження порівняно невеликої потужності. Далі розглядатиметься саме таке виконання СМ.

Збудження синхронних генераторів може здійснюватися від стороннього джерела, наприклад за допомогою генератора постійного струму невеликої потужності (0,5–10 % від потужності СГ), або внаслідок самозбудження. У цьому разі обмотка збудження живиться випрямленим струмом того ж генератора.

Трифазна синхронна машина (рис. 10.1) містить нерухому частину – статор 1 зі станиною та магнітопроводом, у пази якого вкладається трифазна обмотка змінного струму, та рухому частину – ротор. На осерді полюсів 2 (рис. 10.1, *а*) або в пазах ротора 3 (рис. 10.1, *б*) розміщується обмотка збудження 4. За допомогою щіток 5, що ковзають по контактних кільцях 6, обмотка збудження приєднується до джерела постійного струму.

У явнополюсних синхронних генераторах для отримання синусоїдної ЕРС потрібно забезпечити синусоїдний розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку між статором і ротором. Це досягається особливою формою полюсних наконечників (рис. 10.1, *а*) – повітряний проміжок посередині полюса менший, ніж на краях.

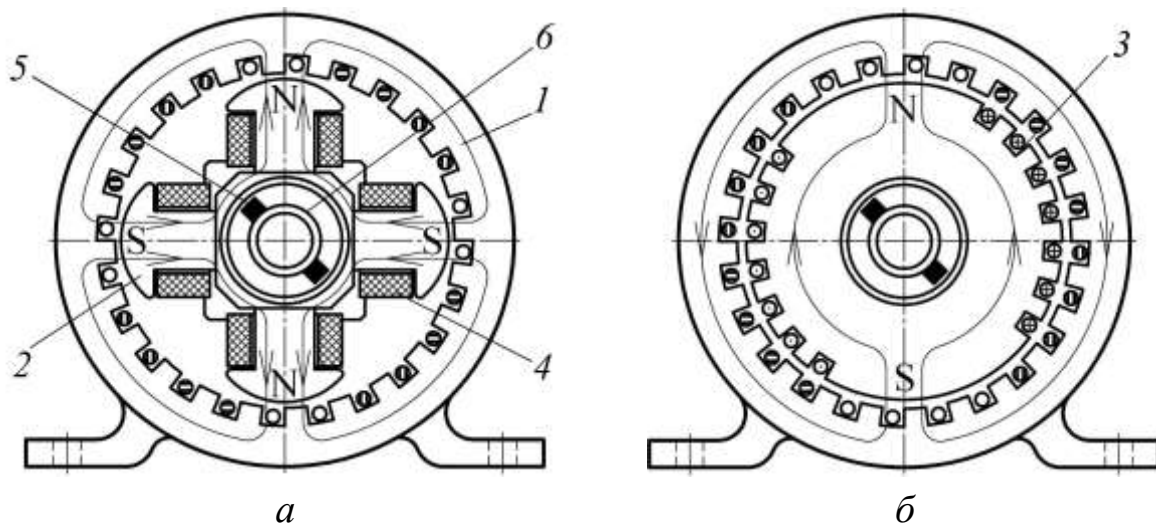


Рис. 10.1. Конструкція трифазної синхронної машини з явнополюсним (а) і неявнополюсним (б) ротором

Статор трифазної СМ має циліндричний магнітопровід (рис. 10.2), у пазах якого розміщені три фазні обмотки, намотані ізолюваним мідним дротом. Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопровід виконується з окремих листів електротехнічної сталі, ізолюваних один від одного шаром лаку або за допомогою оксидування. У режимі двигуна до статорних обмоток підводиться трифазна змінна напруга, яка в підсумку утворює обертове магнітне поле, а в режимі генератора – приєднується навантаження.

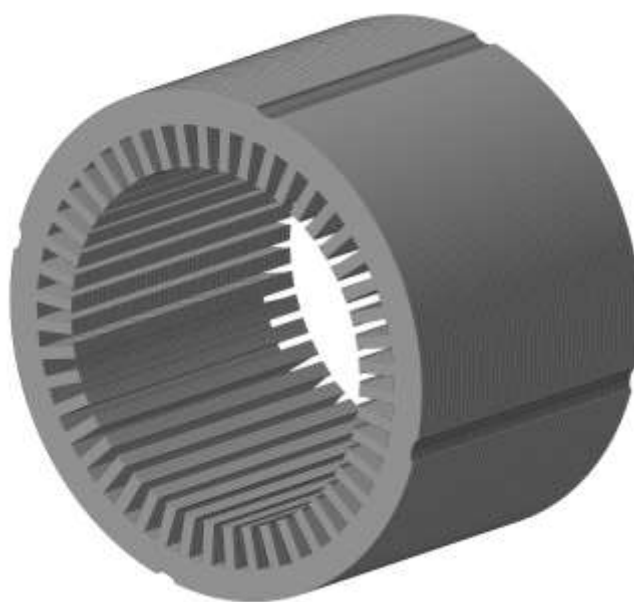


Рис. 10.2. Магнітопровід статора синхронної машини

Ротор *явнополюсної* синхронної машини (рис. 10.3) має магнітопровід, що зазвичай збирається з пластин електротехнічної сталі, які стягуються в пакет за допомогою шпильок. До основи 1 ротора кріпиться обід 2, що має поздовжні вентиляційні канали для покращення умов охолодження. Осердя полюсів, лите або набране з листів електротехнічної сталі, також може виконуватися з радіальними вентиляційними каналами. Для того щоб полегшити процес виготовлення обмотки збудження, кріплення полюсів виконують роз'ємним. У такому разі готову котушку просто надівають на осердя полюса.

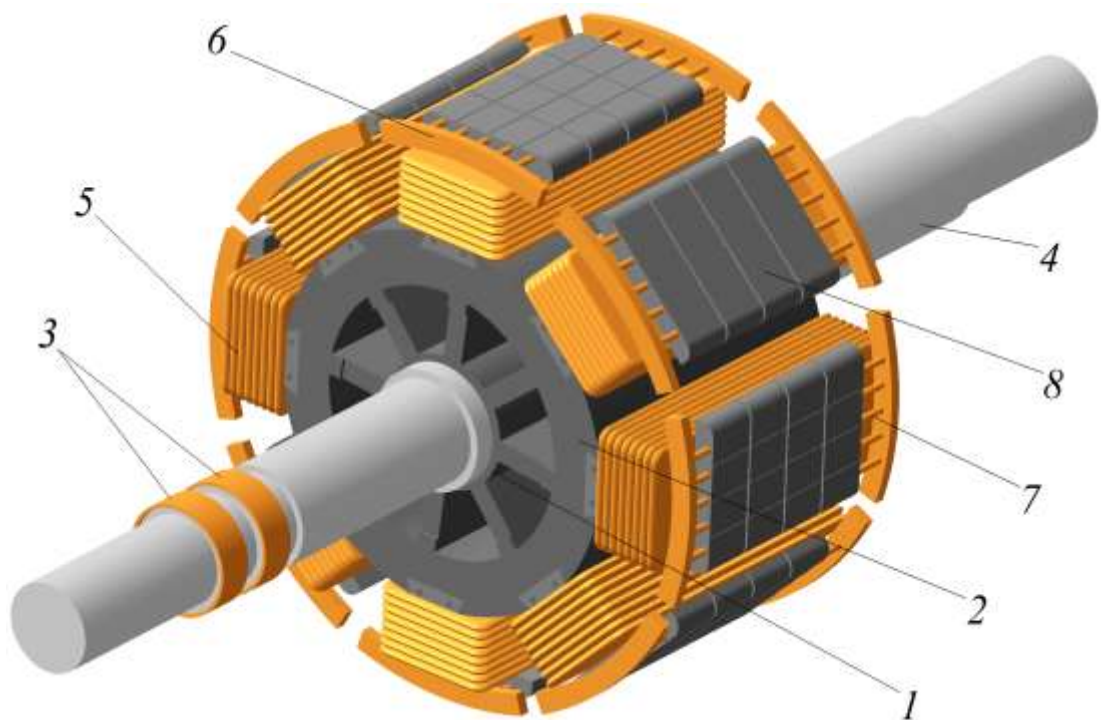


Рис. 10.3. Конструкція явнополюсного ротора: 1 – основа ротора; 2 – обід ротора; 3 – контактні кільця; 4 – вал; 5 – котушка обмотки збудження; 6 – сегмент демпферної обмотки; 7 – стрижень демпферної обмотки; 8 – осердя полюса

У пазах полюсних наконечників синхронних генераторів розміщуються стрижні демпферної обмотки 7, виконані з міді й замкнені з торців сегментами 6. Призначення демпферної обмотки – попередження розкачування ротора, підвищення динамічної стійкості та покращення форми ЕРС. У синхронних двигунах така обмотка виконується з матеріалу, що має підвищений

питомий опір, і називається пусковою, оскільки вона призначена для утворення обертового моменту під час пуску двигуна, тобто за частоти обертання ротора, відмінної від синхронної.

Явнополюсними виконують ротори СГ із невеликими частотами обертання (<1500 об/хв), які зазвичай приєднуються до гідротурбін.

Більшу частоту обертання мають СГ, що приєднуються до парових турбін (1500, 3000 об/хв), тому для збільшення міцності конструкції таких машин їх ротор виконують із неявно вираженими полюсами.

Магнітопровід ротора *неявнополюсної* синхронної машини (рис. 10.4) виконується як одне ціле з валом. На зовнішній циліндричній поверхні магнітопроводу фрезерують пази (радіальні або паралельні), у яких розміщується обмотка збудження (розподілена обмотка). Пази рівномірно розподіляються у двох діаметрально протилежних зонах. Між пазами, у межах цих зон, утворюються малі зубці магнітопроводу 1, між двома зонами – великі зубці магнітопроводу 2. Обмотка ротора закріплюється в пазах за допомогою немагнітних клинів.

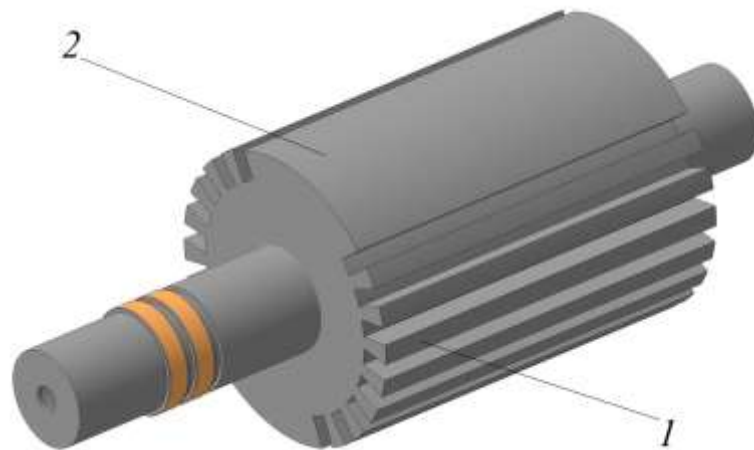


Рис. 10.4. Конструкція ротора неявнополюсної синхронної машини

У трифазній обмотці статора в кожній фазі індукуються ЕРС однакові за амплітудою та частотою. Фазні обмотки зміщені одна

відносно одної на 120° (електричних), тому фазні ЕРС відрізнятимуться за фазою на одну третю періоду:

$$e_A = E_m \sin \omega t; e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3); e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3), \quad (10.1)$$

де $\omega = 2\pi f = 2\pi n$ – кутова частота індукованої ЕРС.

Якщо вважати, що магнітний потік, який зчіплюється з витками статора, під час обертання ротора змінюється за синусоїдним законом, ЕРС одного витка можна записати як

$$e_{coil} = -\frac{d\Psi_{coil}}{dt} = \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = \omega \Phi_m \cos \omega t, \quad (10.2)$$

звідки діюче значення ЕРС витка визначиться за формулою

$$E_{coil} = \frac{\omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \Phi_m f, \quad (10.3)$$

де Ψ_{coil} – потокозчеплення витка; Φ_m – максимальне значення магнітного потоку обертового поля.

Оскільки фазна обмотка синхронної машини зазвичай складається з декількох секцій, які розподілені по кількох пазах, ЕРС витків у різних секціях зсунуті за фазою. Крім того, досить часто обмотки виконують з укороченим кроком, тобто ширина витка дещо менша за полюсну поділку τ . Зазначені причини спричиняють зменшення сумарної ЕРС обмотки, що враховується за допомогою введення обмоткового коефіцієнта $K_W \leq 1$, тобто

$$E = 4,44 f w \Phi_m K_W, \quad (10.4)$$

де w – кількість витків фазної обмотки.

Конструкція синхронного двигуна не має принципових відмінностей від конструкції СГ.

Під час вмикання двигуна в мережу в трифазній обмотці статора утворюється обертове магнітне поле, яке за взаємодії з постійним полем обмотки збудження ротора змушує його обертатися з частотою обертання магнітного поля. Отже, частота обертання СД не змінюється за умови незмінної частоти струму мережі живлення.

Розрізняють три основні способи пуску СД: за допомогою допоміжного двигуна, частотний пуск і асинхронний пуск. У першому випадку на одному валу з двигуном розміщують пускову

машину (зазвичай асинхронний двигун із тією ж або меншою кількістю пар полюсів), яка розганяє його до синхронної швидкості або вище. Під час частотного пуску двигун живлять від окремого синхронного генератора, частоту якого плавно збільшують до номінального значення. У більшості випадків застосовується асинхронний пуск, оскільки він не потребує додаткового обладнання.

Обмотка збудження під час асинхронного пуску замикається накоротко або через реостат з активним опором, значення якого на порядок більше, ніж опір обмотки збудження. Застосування реостата попереджує виникнення перенапруги та пробую ізоляції, а також забезпечує протікання пускового струму в обмотці збудження. Після того як швидкість ротора стане близькою до синхронної, в обмотку збудження подається постійний струм і двигун втягується в синхронізм.

Перехід від режиму генератора до режиму двигуна під час роботи СМ паралельно з мережею ілюструє рис. 10.5. Тут умовно представлено магнітні поля статора та ротора у вигляді двох полюсів, що обертаються з однаковою частотою ω в напрямку, вказаному стрілками.

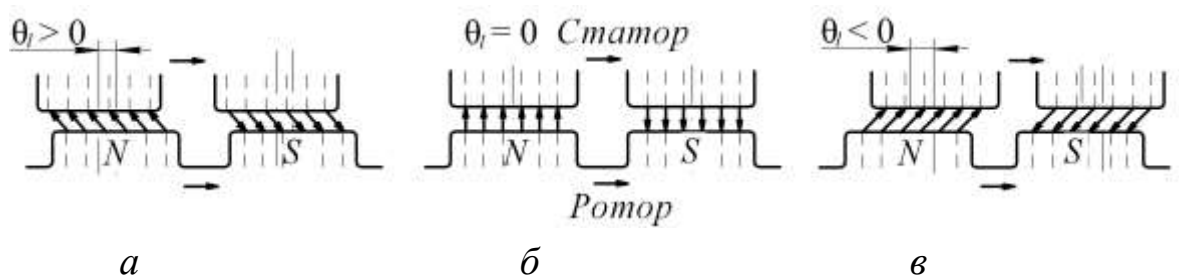


Рис. 10.5. Режими роботи синхронної машини

У разі, якщо СМ працює як генератор, магнітне поле ротора випереджає магнітне поле статора. Магнітні силові лінії в режимі навантаження спрямовані нерадіально, а магнітні полюси статора зсунуті відносно полюсів ротора на кут навантаження θ_l (рис. 10.5, а).

Зі зменшенням механічної потужності, що надходить до генератора від первинного двигуна, кут навантаження θ_l та

потужність, яка віддається в мережу, також почнуть зменшуватися. У режимі холостого ходу кут θ_l дорівнює нулю (рис. 10.5, б), тобто осі магнітних полів статора та ротора збігаються, а до генератора підводиться потужність, потрібна для компенсації втрат холостого ходу.

Якщо $\theta_l < 0$ (режим двигуна), вісь кожного полюса ротора під дією гальмівного моменту навантаження відстає від відповідної вісі полюса статора (рис. 10.5, в). У двигуні зміна навантаження призводить до зміни кута θ_l між полюсами обертового поля статора та ротора за незмінної швидкості обертання останнього.

В обох режимах роботи СМ є максимальна потужність, за якої машина може працювати без порушення синхронного режиму.

10.3. Векторна та енергетична діаграми синхронного генератора

Напругу синхронного генератора в режимі навантаження можна розглядати як геометричну суму всіх ЕРС та напруги на активному опорі обмотки статора. Для явнополюсного генератора рівняння рівноваги напруг можна представити у вигляді

$$\underline{E}_o = \underline{U} - \underline{E}_{sd} - \underline{E}_{sq} - E_l + R_s \underline{I}, \quad (10.5)$$

де $\underline{E}_o$ – ЕРС обмотки статора індукована магнітним потоком обмотки збудження; $\underline{E}_{sd} = -j\underline{I}_d X_{sd}$ – ЕРС зумовлена поздовжньою компонентою магнітного потоку реакції якоря; X_{sd} – індуктивний опір поздовжньої реакції якоря; $\underline{E}_{sq} = -j\underline{I}_q X_{sq}$ – ЕРС зумовлена поперечною компонентою магнітного потоку реакції якоря; X_{sq} – індуктивний опір поперечної реакції якоря; $\underline{E}_l = -j\underline{I} X_l$ – ЕРС зумовлена потоком розсіювання; X_l – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; $R_s \underline{I}$ – падіння напруги на активному опорі обмотки статора. Через відповідні спади напруг рівняння (10.5) запишеться

$$\underline{E}_o = \underline{U} + jX_{sd} \underline{I}_d + jX_{sq} \underline{I}_q + jX_l \underline{I} + R_s \underline{I}. \quad (10.6)$$

Представивши ЕРС розсіювання у вигляді суми відповідних складників по поздовжній і поперечній осях $\underline{E}_l = -jX_l \underline{I} = \underline{E}_{ld} + \underline{E}_{lq} = -jX_l \underline{I}_d - jX_l \underline{I}_q$, рівняння (10.6) можна переписати у вигляді

$$\underline{E}_o = \underline{U} + jX_d \underline{I}_d + jX_q \underline{I}_q + R_s \underline{I}, \quad (10.7)$$

де $X_d = X_{sd} + X_l$ – повний або синхронний індуктивний опір обмотки якоря по поздовжній осі; $X_q = X_{sq} + X_l$ – повний індуктивний опір обмотки якоря по поперечній осі.

Векторна діаграма, що відповідає рівнянню (10.7), показана на рис. 10.6.

На підставі векторної діаграми для проєкції вектора $\underline{E}_o$ та його складників на напрямок вектора $\underline{I}$ можна записати

$$E_o \cos \psi = U \cos \varphi + R_s I \quad (10.8)$$

або

$$E_o I \cos \psi = UI \cos \varphi + R_s I^2, \quad (10.9)$$

де $E_o I \cos \psi$ – електромагнітна потужність P_e ; $UI \cos \varphi$ – активна потужність фази генератора, що віддається в мережу P ; $R_s I^2$ – потужність електричних втрат в обмотці статора P_{els} .

З рівняння (10.9) випливає, що механічні втрати P_{mec} , втрати на гістерезис і вихрові струми (магнітні втрати P_{mag}), втрати на збудження (у разі самозбудження) P_f компенсуються за допомогою приводного двигуна. Відповідну енергетичну діаграму синхронного генератора наведено на рис. 10.7.

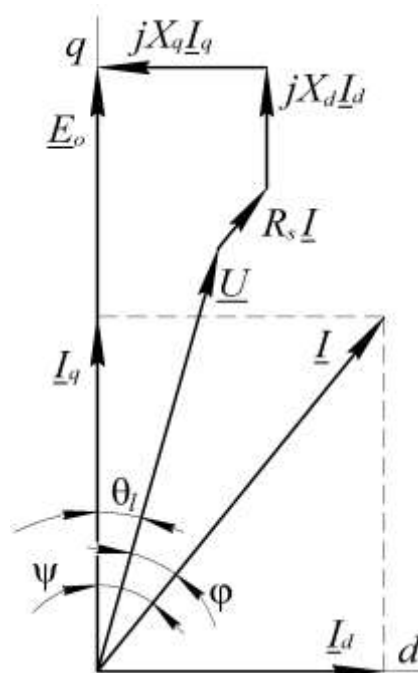


Рис. 10.6. Векторна діаграма явнополюсного синхронного генератора за активно-індуктивного навантаження

10.4. Електромагнітний момент синхронної машини

Електромагнітний момент синхронного генератора, враховуючи (10.9), дорівнює

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{m}{\omega_r} E_o I \cos \psi, \quad (10.10)$$

де m – кількість фаз обмотки статора.

У синхронних машинах великої та середньої потужності електричні втрати в обмотці статора P_{els} порівняно з електромагнітною потужністю незначні. Якщо знехтувати активними втратами в машині, то активна потужність дорівнює електромагнітній і вираз (10.10) запишеться у вигляді

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{m}{\omega_r} UI \cos \varphi.$$

(10.11)

Вираз (10.11) справедливий як для генераторного режиму роботи машини, так і для режиму двигуна. У першому випадку електромагнітний момент є гальмівним, а в другому – рушійним.

Рівняння рівноваги напруг (10.7) при цьому запишеться у вигляді

$$\underline{E}_o = \underline{U} + jX_d \underline{I}_d + jX_q \underline{I}_q. \quad (10.12)$$

Векторна діаграма, що відповідає наведеному рівнянню, зображена на рис. 10.8.

Із наведеної векторної діаграми можна отримати

$$P_e = mUI \cos(\psi - \theta_l) = mUI (\sin \psi \sin \theta_l + \cos \psi \cos \theta_l). \quad (10.13)$$

Враховуючи, що $I \sin \psi = I_d$, а $I \cos \psi = I_q$, рівняння (10.13) можна переписати у вигляді

$$P_e = mU (I_d \sin \theta_l + I_q \cos \theta_l). \quad (10.14)$$

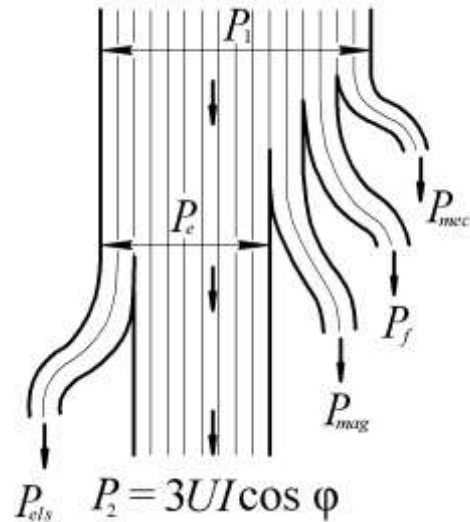


Рис. 10.7. Енергетична діаграма синхронного генератора

З векторної діаграми також випливає:

$$E_o = U \cos \theta_l + I_d X_d; U \sin \theta_l = I_q X_q,$$

звідки

$$I_d = \frac{E_o - U \cos \theta_l}{X_d}; I_q = \frac{U \sin \theta_l}{X_q}. \quad (10.15)$$

Підставивши (10.15) у (10.14), отримаємо вираз для електромагнітної потужності у вигляді

$$P_e = \frac{mUE_o \sin \theta_l}{X_d} + \frac{mU \sin 2\theta_l}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right). \quad (10.16)$$

Тоді електромагнітний момент явнополюсної синхронної машини визначиться за виразом

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{mUE_o \sin \theta_l}{\omega_r X_d} + \frac{mU \sin 2\theta_l}{2\omega_r} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right). \quad (10.17)$$

Перший складник виразу (10.17) являє собою синхронний електромагнітний момент, другий – реактивний момент, що виникає внаслідок різної магнітної провідності ротора по поздовжній і поперечній осях.

Для неявнополюсної синхронної машини $X_d = X_q$, тому електромагнітний момент, із виразу (10.17), дорівнює

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{mUE_o \sin \theta_l}{\omega_r X_d}. \quad (10.18)$$

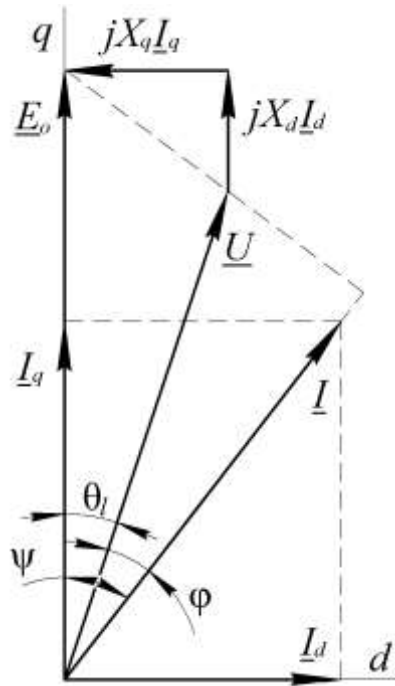


Рис. 10.8. Спрощена векторна діаграма явнополюсного синхронного генератора

Залежність електромагнітного моменту T_e або потужності P_e від кута навантаження θ_l , при $U = \text{const}$, $E_o = \text{const}$, називається

кутовою характеристикою синхронної машини. Вигляд цієї характеристики показано на рис. 10.9.

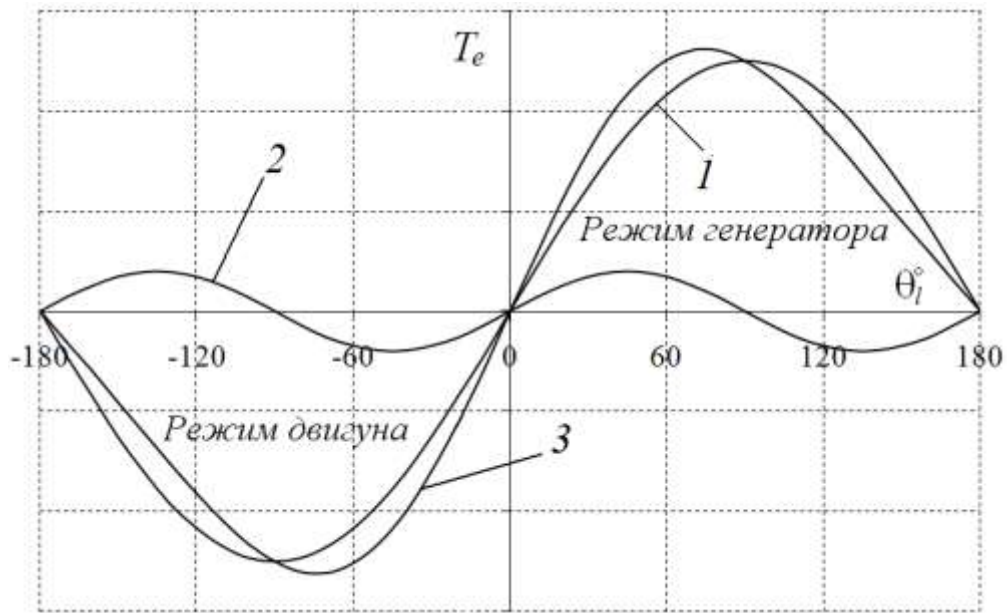


Рис. 10.9. Кутова характеристика синхронної машини

Якщо машина має неявнополюсну конструкцію, кутова характеристика має вигляд кривої 1. У випадку явнополюсного ротора з'являється складник, зумовлений реактивним моментом (крива 2). Сумарному електромагнітному моменту явнополюсної машини відповідає крива 3.

10.5. Характеристики синхронних машин

До основних характеристик СГ належать характеристика холостого ходу, регульовальна, кутова та зовнішня характеристики.

Характеристика холостого ходу являє собою залежність ЕРС холостого ходу генератора E_o від струму збудження I_{fd} (рис. 10.10, а) за номінальних обертів ротора n_{nom} . Нелінійність характеристики зумовлена насиченням сталі магнітопроводів. Номінальний режим збудження вибирають у зоні найбільшої кривизни характеристики (точка А).

Висхідна крива 1 відповідає генератору, магнітна система якого була повністю розмагнічена, а струм збудження змінюється

від нуля до максимально допустимого значення. Зі зменшенням струму збудження I_{fd} від максимального значення до нуля (крива 2) магнітний потік, а отже, і ЕРС, мають більші значення на величину залишкової ЕРС із відповідним їй потоком намагнічування. Площа, обмежена кривими 1, 2, визначається гістерезисом магнітного кола.

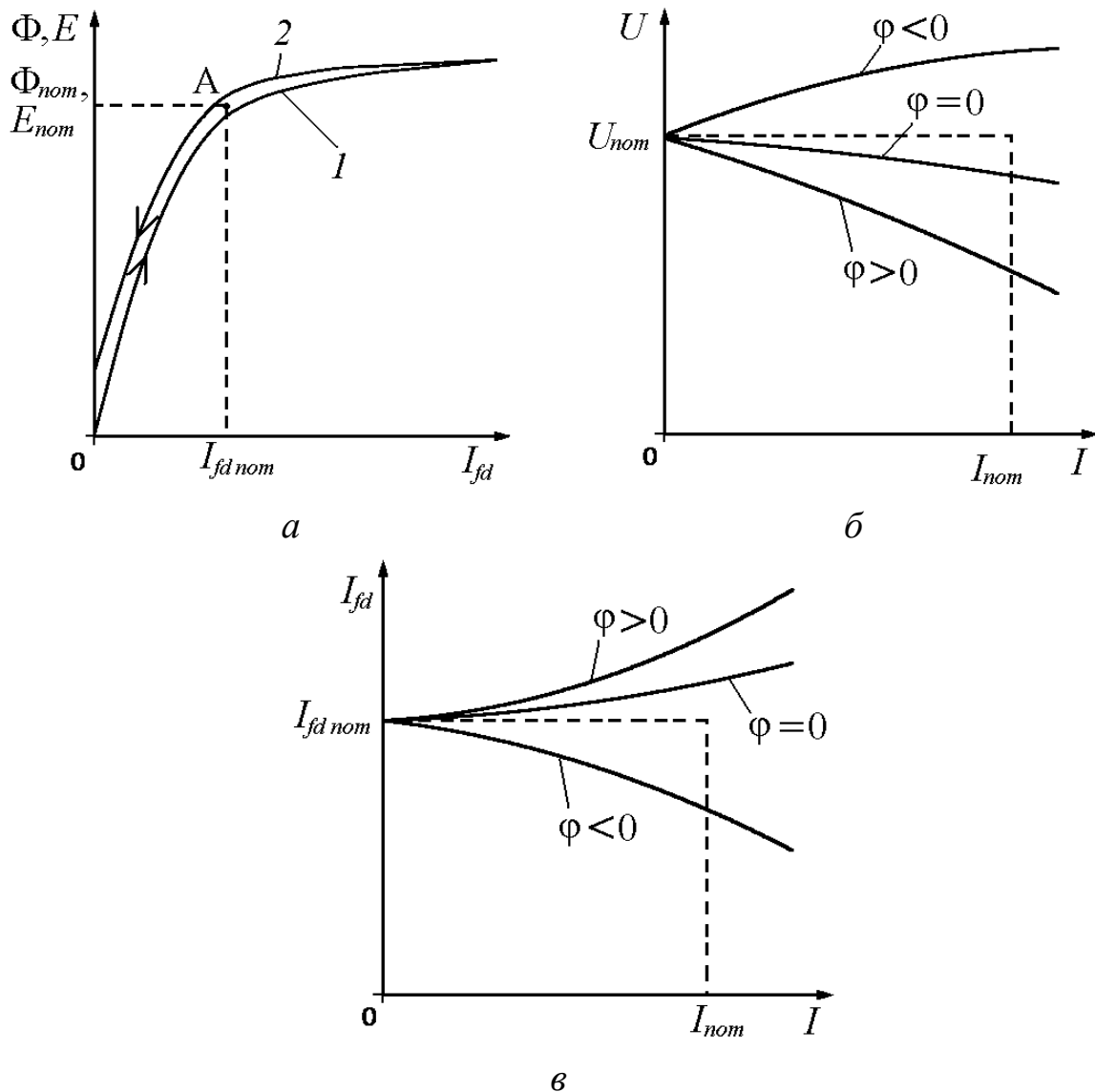


Рис. 10.10. Характеристики синхронного генератора

Зовнішня характеристика СГ – це залежність напруги на затискачах генератора U від струму навантаження I за умови $I_{fd} = \text{const}$, $n = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$ (рис. 10.10, б). Залежно від типу навантаження зовнішня характеристика має спад або підйом.

За індуктивного характеру навантаження реакція якоря та падіння напруги на внутрішніх опорах спричиняють зменшення

напруги генератора, тому характеристика є спадною. За ємнісного навантаження реакція якоря підсилює поле збудження і напруга генератора зростає зі збільшенням навантаження.

Регульовальна характеристика являє собою залежність струму збудження I_{fd} від струму навантаження I за умови $n = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, $U = \text{const}$. Ця характеристика показує, як потрібно змінювати струм збудження для того, щоб під час зміни навантаження значення напруги генератора залишалося незмінним.

Зі зростанням індуктивного навантаження потрібно збільшувати струм збудження, ємнісного, навпаки, – зменшувати. Регульовальні характеристики для різних значень $\cos\varphi$ наведені на рис. 10.10, в.

До основних характеристик синхронних двигунів належать кутова та робочі характеристики. *Робочими характеристиками* називають залежності потужності споживання P_1 , струму двигуна I , ККД η , обертового моменту T та коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ від корисної потужності на валу P_2 . Характеристики отримуються за умов: $f = \text{const}$; $U = \text{const}$; $I_{fd} = \text{const}$.

На рис. 10.11 зазначені робочі характеристики для випадку, коли в режимі холостого ходу $\cos\varphi = 1$. Зі збільшенням навантаження коефіцієнт потужності дещо знижується. Регулюванням струму збудження можна досягти такого режиму роботи, коли $\cos\varphi = 1$ за потрібного навантаження.

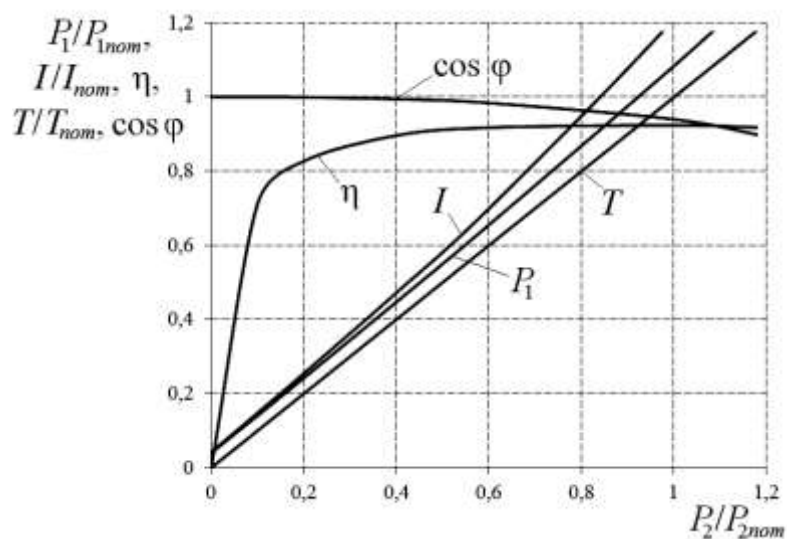


Рис. 10.11. Робочі характеристики синхронного двигуна

Струм холостого ходу за умови, що $\cos\varphi = 1$, дуже незначний і відповідає втратам холостого ходу. Зі збільшенням навантаження струм зростає практично лінійно. Корисний момент на валу T унаслідок того, що $\omega_r = \text{const}$, має вигляд прямої лінії. Максимальний ККД двигуна зазвичай має місце в разі навантаження $0,5\text{--}0,75P_{\text{ном}}$.

Запитання для самоперевірки

1. У чому полягає основна особливість синхронних електричних машин і яка сфера їх застосування?
2. Поясніть будову і призначення основних частин синхронної машини.
3. Поясніть відмінності синхронних машин з явнополюсним і неявнополюсним ротором.
4. У чому полягає принцип роботи синхронного генератора?
5. Що розуміють під характеристикою холостого ходу генератора?
6. Що розуміють під зовнішньою характеристикою синхронного генератора і як вона залежить від характеру навантаження?
7. Що розуміють під електромагнітною потужністю? Роль електромагнітного моменту в генераторі та двигуні.
8. Що таке кутова характеристика? Яким кутом навантаження обмежується зона стійкої роботи машини?
9. За яких умов синхронна електрична машина переходить у режим двигуна?
10. Як впливає струм збудження на коефіцієнт потужності синхронного двигуна?
11. Які залежності називаються робочими характеристиками синхронного двигуна і який вони мають характер?

Лекція 11. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

11.1. Основні поняття

Під *вимірюванням* розуміють процес, що полягає в порівнянні за допомогою експерименту вимірюваної фізичної величини з певним її значенням, яке зазначають як одиницю. Інакше кажучи, вимірювання – це знаходження значень фізичних величин досліdnим способом за допомогою спеціальних технічних засобів.

Результат вимірювань загалом можна записати

$$X = n(x), \quad (11.1)$$

де X – вимірювана величина; n – кількісна характеристика вимірювання; x – одиниця вимірювання.

Розрізняють *істинне* та *дійсне* значення вимірюваної величини. Під істинним розуміють значення, яке не має похибки вимірювання. Під дійсним розуміють значення, отримане за результатами вимірювання з допустимою похибкою. Якщо похибкою вимірювання можна знехтувати, то істинне значення збігається з дійсним.

Під *похибкою* розуміють відхилення отриманого результату вимірювання від істинного значення. Залежно від характеру зміни розрізняють систематичні, випадкові та грубі похибки.

Систематичні похибки змінюються закономірно, у разі повторних вимірювань залишаються постійними й виявляються тільки під час перевірки приладу.

Випадкові похибки виявляються під час повторних вимірювань у вигляді розкиду результатів.

Грубі похибки дають суттєву відмінність від очікуваного результату. Заміри з грубими похибками не враховують.

Залежно від джерела виникнення похибки вимірювання поділяють на апаратні, методичні й суб'єктивні.

Апаратні, або інструментальні, похибки залежать від похибок використовуваних засобів вимірювань.

Методичні, або теоретичні, похибки з'являються внаслідок недосконалості методів вимірювань, використання наближених співвідношень, покладених в основу обраного методу вимірювання, неврахування впливу певних факторів на точність вимірювання.

Суб'єктивні похибки – це похибки, викликані недосконалістю органів чуття оператора, його неуважністю під час проведення вимірювання.

Залежно від значення вимірюваної величини X похибки поділяють на *адитивні*, абсолютне значення яких не залежить від X , і *мультиплікативні*, абсолютне значення яких пропорційно X .

Засобами електричних вимірювань називають технічні пристрої, які застосовують для електричних вимірювань і які мають нормовані метрологічні характеристики. До засобів електричних вимірювань належать міри, електровимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі, електровимірювальні установки й вимірювальні інформаційні системи.

Мірою називають засіб вимірювання, призначений для відтворення фізичної величини заданого значення. До основних мір електричних величин належать міри ЕРС, електричного струму, електричного опору, індуктивності, електричної ємності та ін.

Залежно від ступеня точності й галузі застосування міри поділяють на еталони, зразкові й робочі міри.

Еталони забезпечують відтворення та зберігання одиниці фізичної величини для передачі її розміру іншим засобам вимірювання.

Зразкові міри призначені для перевірки та градуювання робочих мір і вимірювальних приладів.

Робочі міри використовують для перевірки вимірювальних приладів, а також для вимірювання в усіх галузях господарства.

Електровимірювальними приладами (ЕВП) називають засоби електричних вимірювань, призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем. До них належать, наприклад, амперметр, вольтметр, ватметр, лічильник.

Вимірювальними перетворювачами називають засоби електричних вимірювань, призначені для вироблення сигналу електричної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки та зберігання, але такого, що не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем. Їх поділяють на перетворювачі електричних величин на електричні (шунти, дільники напруги, вимірювальні трансформатори та ін.), перетворювачі неелектричних величин на електричні, на первинні перетворювачі (терморезистори, термопари, тензорезистори, ємнісні й індуктивні перетворювачі та ін.).

Електровимірювальна установка – це сукупність функціонально об'єднаних і розташованих в одному місці засобів вимірювань (мір, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів) і допоміжних пристроїв, що призначені для отримання сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Вимірювальна інформаційна система – сукупність засобів вимірювань і допоміжних пристроїв, з'єднаних каналами зв'язку, що призначені для отримання сигналів вимірювальної інформації від низки джерел у формі, зручній для обробки, передачі й використання в системах керування.

11.2. Загальні технічні характеристики електровимірювальних приладів

Під час електричних вимірювань потрібно брати до уваги мінімальну і максимальну межі вимірювань, ціну поділки приладу, його чутливість, похибку вимірювання, вхідний опір, споживану потужність.

Верхню межу вимірювального приладу називають *нормувальним значенням* X_n .

В електромеханічних (стрілкових) ЕВП стрілка показує вимірювану величину в поділках. Щоб перейти до величини

вимірювання, потрібно визначити ціну поділки (кількість одиниць вимірюваного параметра в одній поділці шкали ЕВП)

$$C = \frac{X_n}{N}, \quad (11.2)$$

де N – кількість поділок шкали.

Значення фізичної величини визначають у такий спосіб

$$X = Cn, \quad (11.3)$$

де n – кількість поділок відхилення стрілки приладу.

Під *чутливістю ЕВП* розуміють відношення зміни сигналу на виході приладу до зміни вимірюваної величини. Чим меншу зміну вимірюваної величини прилад може фіксувати, тим вища точність вимірювання може бути забезпечена.

Розрізняють *абсолютну* $S_{аб}$ та *відносну* $S_{від}$ *чутливості*:

$$S_{аб} = \frac{\Delta I}{\Delta X}; \quad S_{від} = \frac{\Delta I}{\Delta X / X}, \quad (11.4)$$

де ΔI – зміна сигналу на виході приладу; ΔX – зміна вимірюваної величини; X – значення вимірюваної величини.

Зміна вимірюваної величини, що викликає найменше переміщення покажчика приладу, яке можна помітити за нормального способу відліку, називають *порогом чутливості*.

Чутливість S пов'язана із ціною поділки приладу C таким співвідношенням

$$S = \frac{1}{C}. \quad (11.5)$$

Межі допустимих похибок (основних і додаткових) можуть бути виражені у формах абсолютної, відносної і приведеної похибок.

Абсолютна похибка – це різниця між вимірюваним X і дійсним X_0 значеннями

$$\Delta X = X - X_0. \quad (11.6)$$

Абсолютну похибку вимірюють в одиницях вимірюваної величини.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_0} 100\%. \quad (11.7)$$

Відносна похибка характеризує точність вимірювання. Її виражають або у відносних одиницях, або у відсотках. Вона може мати як додатні, так і від'ємні значення.

За способом вираження розрізняють такі похибки засобів вимірювання: абсолютні й відносні (аналогічні абсолютній (11.6) і відносній (11.7) похибкам вимірювання), а також приведені похибки засобів вимірювання.

Абсолютну похибку, взяту зі зворотним знаком, називають поправкою

$$P = -\Delta X = X_0 - X. \quad (11.8)$$

Приведена похибка – це відношення абсолютної похибки до нормуючого значення

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} 100\%, \quad (11.9)$$

де X_N – нормуюче значення, яке може дорівнювати верхній межі шкали, діапазону вимірювань, довжині шкали та ін.

Для більшості приладів $X_N = X_n$, де X_n – межа вимірювання ЕВП або номінальне значення вимірюваної величини.

Як і відносна, приведена похибка може виражатись або у відносних одиницях, або у відсотках.

За характером зміни розрізняють систематичні й випадкові похибки ЕВП, за умовами застосування ЕВП – основні й додаткові.

Основна похибка виникає в ЕВП за нормальних умов експлуатації: температура навколишнього середовища $20 \pm 5^\circ\text{C}$, атмосферний тиск 750 ± 30 мм. рт. ст., відносна вологість $65 \pm 15\%$, напруга живлення $220 \pm 4,4$ В (для мережі з частотою 50 Гц), нормальне положення шкали приладу, відсутність зовнішніх електричних і магнітних полів, крім земного, та ін.

Додаткові похибки ЕВП виникають у разі відхилення умов від нормальних значень.

Клас точності ЕВП – це узагальнена характеристика, обумовлена межами допуску основних і додаткових похибок, а

також іншими властивостями вимірювального засобу, що впливають на точність, значення яких встановлено в стандартах на окремі види вимірювальних засобів.

На шкалі приладу маркують значення класу точності у вигляді числа, що вказує нормувальне значення похибки у відсотках.

Для засобів, що вимірюють електротехнічні величини і мають верхні межі, клас точності встановлюють за приведеною похибкою. Для засобів вимірювань, що не мають верхніх меж, клас точності встановлюють за відносною похибкою.

За класом точності засоби вимірювань поділяють на чотири групи.

1. Засоби вимірювань, у яких переважає адитивний складник похибки. Це показувальні й самописні прилади з адитивною похибкою від тертя, зміни положення в просторі та ін. Для цієї групи нормується значення похибки, виражене у відсотках (11.9). Його використовують для позначення класу точності.

Показувальні ЕВП мають 8 класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 – лабораторні прилади; 1,0; 1,5; 2,5; 4 – технічні прилади. Цифра, що характеризує клас точності, визначає виражену у відсотках максимальну основну приведену похибку приладу.

Відносну похибку ЕВП визначають відношенням

$$\delta = \pm \gamma \frac{X_n}{X}, \quad (11.10)$$

де γ – клас точності приладу.

З виразу (11.10) випливає, що відносна похибка вимірювань, яка характеризує їхню точність, залежить не тільки від класу точності приладу, а й від того, на якій частині шкали виконується вимірювання.

Будь-який показувальний ЕВП доцільно використовувати в останній чверті шкали приладу. На початку шкали навіть прилад високого класу точності може дати досить велику відносну помилку вимірювання.

2. Засоби вимірювань, у яких переважає мультиплікативний складник похибки: дільники напруги, шунти, вимірювальні

трансформатори струму й напруги та ін. У цій групі нормують межу щодо припустимої похибки у відсотках, а клас точності позначають числом, розміщеним у кружку. Наприклад (1,5) показує, що відносна похибка в будь-якій точці не перевищує $\pm 1,5\%$.

3. Засоби вимірювань, у яких адитивний і мультиплікативний складники помилки зіставні. Це цифрові прилади, прилади порівняння з ручним і автоматичним урівноважуванням (мости, компенсатори). Для цієї групи приладів межа відносної припустимої основної похибки виражається виразом

$$\delta = \pm \gamma \left(c + d \left(\frac{X_n}{X} - 1 \right) \right) \%, \quad (11.11)$$

де X_n – межа вимірювань; X – вимірювана величина;
 $d = \gamma_a = \frac{\Delta X_a}{X_n} 100\%$ – приведення значення адитивного складника похибки, виражене у відсотках; $c = \delta_m + \gamma_a$, причому $\delta_m = \frac{\Delta X_m}{X_n}$ – відносна значення мультиплікативного складника похибки у відсотках; c і d – сталі числа, а відношення c/d – клас точності приладу, наприклад 0,02/0,01. Чисельник c дорівнює відносній похибці засобу вимірювання в оптимальних умовах, коли $X = X_n$, а знаменник d характеризує збільшення відносної похибки вимірювань зі зменшенням X , тобто вплив адитивного складника похибки.

4. Засоби вимірювань, у яких переважає адитивний складник похибки і які мають помітно виражену нерівномірну шкалу, наприклад гіперболічну або логарифмічну. У цьому разі нормується приведення значення похибки щодо шкали. Клас точності позначається у вигляді числа, розміщеного між двома лініями, розташованими під кутом, наприклад $\frac{1,5}{\angle}$. Цифра класу точності означає межу припустимої приведенної похибки, вираженої у відсотках, щодо шкали приладу в міліметрах.

11.3. Класифікація методів електричних вимірювань

Залежно від способу одержання результату вимірювання поділяють на два види: прямі й непрямі.

Прямими називають вимірювання, під час яких шукане значення фізичної величини визначають безпосередньо за показами приладу (вимірювання струму амперметром, електроенергії лічильником, напруги вольтметром та ін.).

Непрямими називають вимірювання, під час яких шукане значення фізичної величини знаходять на підставі відомої функціональної залежності між цією величиною і величинами, отриманими за результатами прямих вимірювань. Прикладом може бути визначення електричного опору за показами амперметра й вольтметра.

Залежно від сукупності прийомів використання принципів і засобів вимірювань усі методи поділяють на методи безпосередньої оцінки й методи порівняння.

Під *методом безпосередньої оцінки* розуміють метод, за яким значення вимірюваної величини визначають безпосередньо за показами відлікового пристрою вимірювального приладу прямої дії (значення струму – за показами амперметра, значення напруги – за показами вольтметра та ін.).

Методом порівняння називають метод, за яким вимірювана величина в спеціальному вимірювальному колі порівнюється з величиною, відтвореною мірою. Методи порівняння поділяють на нульовий, диференціальний і заміщення.

Нульовий метод – метод порівняння вимірюваної величини з мірою, де результуючий ефект впливу порівнюваних величин на прилад порівняння доводять до нуля.

Диференціальний метод – метод порівняння, за яким на вимірювальний прилад впливає різниця між вимірюваною величиною і величиною, відтвореною мірою (наприклад, вимірювання електричного опору за допомогою неврівноваженого моста).

Метод заміщення – метод порівняння з мірою, за яким вимірювану величину заміщають у вимірювальній установці відомою величиною, відтвореною мірою. При цьому за допомогою зміни відомої величини домагаються таких самих показів приладу, що були під час дії вимірюваної величини (наприклад, порівняння опору резистора з опором зразкової котушки, яку включають поперемінно до того самого плеча моста).

11.4. Вимірювальні перетворювачі

Вимірювальні перетворювачі становлять численну групу засобів вимірювань, призначених для перетворення вимірюваної фізичної величини X у зручну для реєстрації величину (зазвичай напругу або струм) Y (рис. 11.1).

В електротехніці використовують такі перетворювачі: шунти й додаткові опори; вимірювальні трансформатори струму й напруги; перетворювачі роду струму.



Рис. 11.1. Вимірювальний перетворювач

Шунти – це резистори, ввімкнені послідовно до кола вимірюваного струму паралельно з вимірювальним перетворювачем (рис. 11.2). Затискачі шунта, до яких підводять струм, називають струмовими затискачами і позначають на схемах (*). Затискачі, до яких приєднують вимірювальний перетворювач, називають потенціальними і позначають (V).

Шунти характеризуються номінальними значеннями вхідного струму й вихідної напруги. Відношення номінальної напруги до номінального струму визначається номінальним опором шунтів.

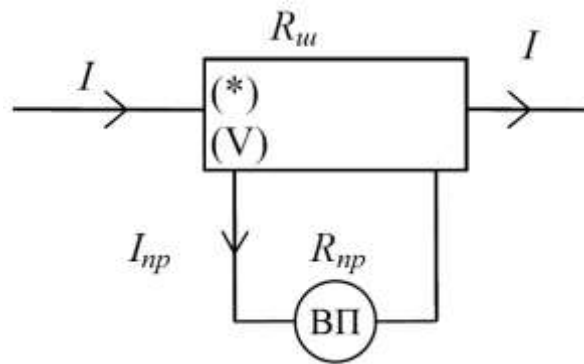


Рис. 11.2. Схема включення шунта

Номінальний струм у колі дорівнює

$$I = I_{шп} \left(\frac{R_{шп}}{R_{ш}} + 1 \right) = I_{шп} p, \quad (11.12)$$

де $p = \frac{R_{шп}}{R_{ш}} + 1$ – коефіцієнт, що називається шунтувальним множником. Він показує, у скільки разів вимірюваний струм у колі I більший за струм приладу $I_{шп}$ або у скільки разів розширюється межа вимірювання струму.

Шунти бувають: внутрішні та зовнішні; одно- і багатомежеві.

За точністю їх поділяють на такі класи: 0,02; 0,05; 0,16; 0,2; 0,5; 1.

Застосовують шунти переважно в колах постійного струму. На змінному струмі розподіл струму в паралельних вітках залежить від індуктивності та частоти, що вносить додаткову похибку у вимірювання.

Додаткові опори застосовують для розширення меж вимірювання напруги. Їх вмикають послідовно з вимірювальним перетворювачем (рис. 11.3).

Відповідно до рис. 11.3 можна записати

$$U = U_{шп} + U_{\partial} = I_{шп} (R_{шп} + R_{\partial}), \quad (11.13)$$

звідки

$$R_{\partial} = \frac{U - I_{шп} R_{шп}}{I_{шп}} = R_{шп} (p - 1), \quad (11.14)$$

де $p = \frac{U}{U_{np}}$ – коефіцієнт розподілу напруги.

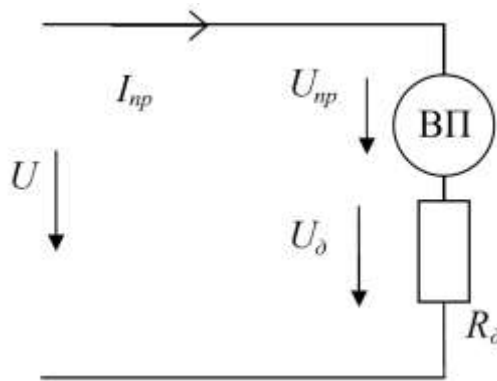


Рис. 11.3. Схема вмикання додаткового опору

Із (11.14) випливає, що додатковий опір повинен бути в $(p - 1)$ разів більшим від опору приладу.

Для одержання багатомежевих вольтметрів часто застосовують додаткові опори, що складаються з кількох резисторів. За таким же принципом виконують дільники напруги, включаючи послідовно резистори, з виводів яких можна знімати потрібну напругу.

Додаткові опори мають такі класи точності: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1. Їх виготовляють на номінальні струми: 0,5; 1; 3; 5; 7; 15 А і на 30 мА.

Вимірювальні трансформатори струму й напруги використовують як перетворювачі великих змінних струмів і напруг на порівняно малі струми та напруги (лекція 7), які є більш зручними для вимірювання.

Випрямні перетворювачі використовують в ЕВП для перетворення змінного струму на постійний. Їх виготовляють на базі напівпровідникових діодів.

Основна характеристика випрямного перетворювача – коефіцієнт випрямлення k_B , який характеризує відношення прямого струму через діод до зворотного

$$k_B = \frac{I_{np}}{I_{зв}} = \frac{R_{зв}}{R_{np}}, \quad (11.15)$$

де $R_{пр}$, $R_{зв}$ – відповідно прямий і зворотний опір діода.

Коефіцієнт випрямлення залежить від значення напруги, температури навколишнього середовища та частоти змінного струму.

На рис. 11.4 наведено залежність коефіцієнта випрямлення від прикладеної напруги. За напруги $U < U_{\min}$ випрямлення не відбувається. Коли $U > U_{\max}$, відбувається пробій діода.

Для германієвого діода $k_B = (4-5) \cdot 10^3$, для кремнієвого – $k_B = 10^5-10^6$.

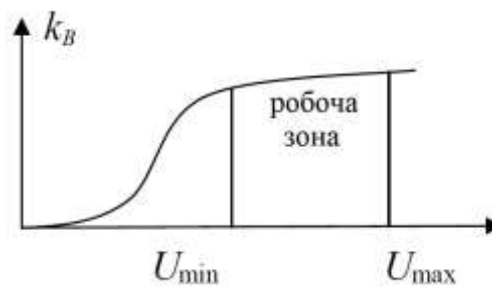


Рис. 11.4. Залежність $k_B = f(U)$

Прилади з випрямлячами вимірюють середнє значення струму та напруги. Для перерахунку цих значень у діючі потрібно врахувати коефіцієнт форми кривої струму або напруги.

11.5. Вимірювання неелектричних величин

В інженерній практиці під час контролю різних виробничих процесів часто доводиться мати справу з вимірюванням неелектричних величин: механічних (сила, тиск, швидкість та ін.), теплових (температура, теплоємність), світлових (освітленість, світловий потік) та ін.

Для контролю неелектричних величин широко застосовують електричні методи й електровимірювальні прилади. Вони дають змогу одержувати дані з високим ступенем точності й у широкому діапазоні зміни значень величин, визначати характеристики об'єктів, що перебувають на великих відстанях і у важкодоступних

місцях, вивчати процеси, запам'ятовувати результати вимірювання за допомогою обчислювальних машин або інформаційних систем тощо.

Для того щоб виміряти ту чи іншу неелектричну величину, її потрібно попередньо перетворити на електричний сигнал. Таке перетворення здійснюють за допомогою датчиків або первинних перетворювачів. На рис. 11.5 показана структурна схема пристрою для вимірювання неелектричної величини електричним методом. Тут: ПП – первинний перетворювач; ЕК – електричне вимірювальне коло; ВП – вихідний пристрій.

Вимірювана неелектрична величина x надходить на вхід ПП, на виході якого з'являється електричний сигнал $y = f(x)$. Далі цей сигнал перетворюється в ЕК на інший електричний сигнал $U(x)$, що сприймається ВП, унаслідок чого на виході всього пристрою отримують сигнал, пропорційний вимірюваній величині $\alpha(x)$.



Рис. 11.5. Структурна схема пристрою для вимірювання неелектричної величини

Первинні перетворювачі (ПП), які використовують у вимірюваннях, дуже різноманітні за конструкцією та принципом дії. Вони поділяються на генераторні й параметричні.

Генераторні ПП виробляють ЕРС або струм, і для їхньої роботи зазвичай не потрібне додаткове джерело живлення. До генераторних ПП належать термоелектричні перетворювачі (термопари), індукційні, п'єзоелектричні, гальванічні перетворювачі та низка інших.

Параметричні ПП перетворюють зміну вимірюваної неелектричної величини на зміну того чи іншого параметра електричного кола (опору R , індуктивності L , взаємної індуктивності M , ємності C). Для їх роботи потрібне додаткове

джерело живлення. До параметричних ПП належать: терморезистори, тензорезистори, реостатні, індуктивні, ємнісні перетворювачі та ін.

Електричні вимірювальні кола (ЕК) переважно складаються з мостів або вимірювальних потенціометрів. У найпростішому випадку ЕК може не бути, а сигнал надходить безпосередньо на вихідний прилад.

Вихідні пристрої (ВП), які використовують для вимірювання неелектричних величин, досить різноманітні. Якщо кількість одночасно контрольованих величин досить значна, сигнали з усіх ВП можуть надходити до диспетчерського пункту або до інформаційно-вимірювальної системи.

Запитання для самоперевірки

1. У чому різниця між точністю і чутливістю приладу?
2. Як розширюють межі вимірювання струму й напруги в колах постійного та змінного струмів?
3. Наведіть види похибок вимірювання.
4. Наведіть класи точності засобів вимірювань. Як вони визначаються?
5. Дайте класифікацію методів електричних вимірювань.
6. Наведіть типи вимірювальних перетворювачів.
7. Поясніть способи вимірювання неелектричних величин.

Лекція 12. ОСНОВИ ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Сучасний науково-технічний прогрес у багатьох галузях промисловості, зокрема і в будівництві, пов'язаний із розвитком електроніки. В електронній техніці виділяють силову й інформаційну електроніку. Одним з основних завдань сигової електроніки є перетворення різних видів електричної енергії, зокрема змінного струму на постійний. Інформаційна електроніка переважно використовується для розв'язання завдань керування інформаційними потоками, як-от перетворення й обробки сигналів.

12.1. Елементи напівпровідникової техніки

Серед усіх силових напівпровідникових приладів діод є найбільш простим. Він має два виводи, які з'єднані з ділянками різних типів електричної провідності напівпровідника: електронною – n -типу та дірковою – p -типу (рис. 12.1). На межі цих ділянок виникає електронно-дірковий перехід, фізичні якості якого змінюються залежно від полярності прикладеної напруги. Вивід з p -ділянки напівпровідника називається анодом (A), а вивід з n -ділянки – катодом (C). Якщо потенціал аноду вищий, ніж потенціал катода (таке вмикання називається прямим), діод проводить прямий струм i_f в напрямку, показаному на рис. 12.1, б. Між виводами в такому випадку буде незначна пряма напруга, зумовлена наявністю невеликого опору відкритого діода.

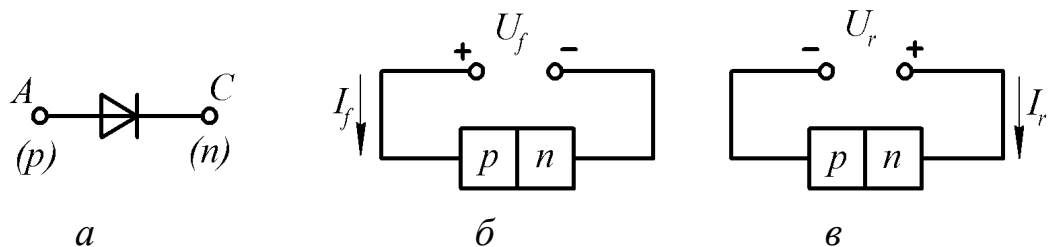


Рис. 12.1. Напівпровідниковий діод: а – умовне графічне позначення; б – пряме вмикання; в – зворотне вмикання

Якщо діод ввімкнено у зворотному напрямку (рис. 12.1, в), то потенціал катоду вищий за потенціал аноду. Зворотній струм, який протікатиме через діод i_r , має невелике значення (у закритому стані опір діоду досить значний) і мало залежить від прикладеної напруги.

Одними з найважливіших характеристик напівпровідникових приладів є *вольт-амперні характеристики (ВАХ)*, які пов'язують значення струмів і напруг на приладі в різних режимах його роботи. Типова ВАХ діоду в статичному режимі показана на рис. 12.2. Вона має пряму ділянку 1, що відповідає прямому вмиканню діоду, і зворотну 2.

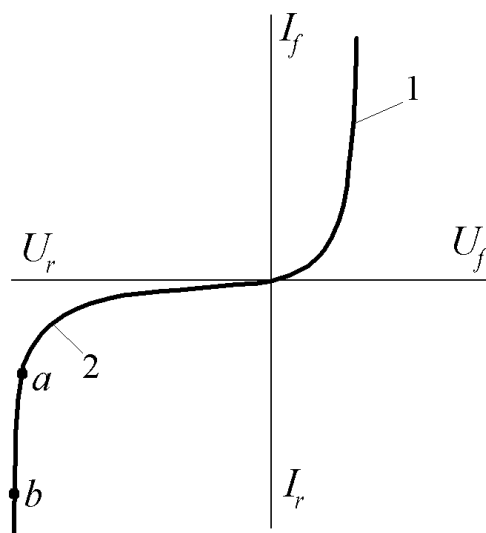


Рис. 12.2. Статична ВАХ діода

До основних параметрів силових діодів належать: *постійна пряма напруга* U_f – постійна напруга на діоді за заданого прямого струму; *постійний зворотний струм* I_r – постійний струм, який протікає в зворотному напрямку за заданої зворотної напруги; *час прямого відновлення діода* t_{fr} – час, упродовж якого відбувається вмикання діода і пряма напруга на ньому встановлюється від нуля до заданого значення; *час зворотного відновлення діода* t_{rr} – час перемикавання діода від заданого прямого струму до заданої зворотної напруги, що відраховується від моменту проходження струму через нульове значення до моменту досягнення зворотним струмом заданого значення.

Під час вмикання діод може вважатись ідеальним ключем, оскільки час його вмикання набагато менший, ніж час перехідних процесів у силовому колі. Однак у разі вимикання діод проводить зворотний струм протягом часу зворотного відновлення t_{rr} (рис. 12.3). Протікання зворотного струму зумовлено наявністю носіїв зарядів, що продовжують деякий час підтримувати провідність діоду. У більшості випадків цей струм не впливає на характеристики ключа й діод можна вважати ідеальним приладом також і в разі вимикання. Проте у випадку індуктивного навантаження зворотний струм може призвести до перенапруги в колі. Тому у високочастотних силових колах переважно застосовують діоди з малим часом відновлення.

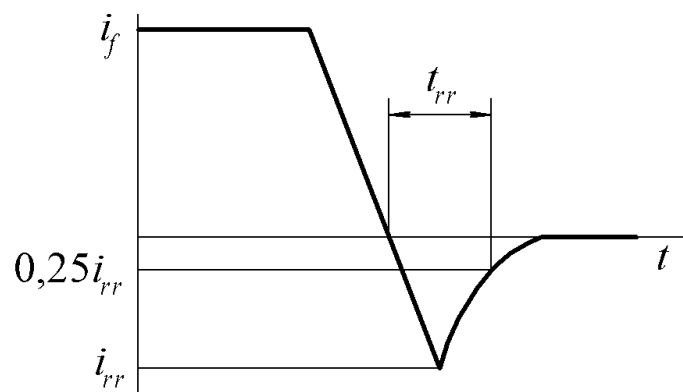


Рис. 12.3. Вимикання діода

Граничними параметрами діода є: *максимально допустима постійна зворотна напруга $U_{r,max}$; максимально допустимий прямий струм $I_{f,max}$.*

Залежно від призначення параметри діодів можуть змінюватися в широких межах. *Випрямні діоди* мають великі значення прямого струму (до кількох сотень ампер), незначний прямий опір і великий зворотний. Масивна структура таких діодів погіршує їх швидкодію. Час зворотного відновлення випрямних діодів зазвичай перебуває в діапазоні 25–100 мкс, що обмежує їх застосування на високих частотах. Найчастіше такі діоди використовують для випрямлення змінної напруги із частотою 50 Гц, звідки і походить їх назва.

Імпульсні діоди призначені для перетворення імпульсних сигналів у пристроях радіо- та відеозв'язку, ключових, логічних схемах та ін. Час зворотного відновлення діодів цієї групи менший, ніж у випрямних, що дає змогу їм працювати у високочастотних колах. Однак гранично допустимі показники (прямий струм і зворотна напруга) в імпульсних діодів менші.

Для стабілізації напруги застосовують *стабілітрони* – напівпровідникові діоди, напруга на яких зберігається сталою (з певною точністю) під час проходження крізь них струму в заданому діапазоні. У стабілітронах робочою є зворотна ділянка ВАХ в зоні електричного пробоя p - n переходу (ділянка ab на рис. 12.2). На цій ділянці напруга на діоді незначно залежить від струму, що протікає через нього.

Найбільш потужними силовими ключами, здатними комутувати кола з напругою до 10 кВ і струмами до 10 кА, є *тиристори*. Це напівпровідникові прилади з двома стійкими станами (відкритий або закритий), які мають три або більше p - n переходи. Структура триелектродного тиристора (silicon-controlled rectifier – SCR) містить чотири шари з різними типами провідності p - та n -типу (рис. 12.4, б). Крайні зони структури – відповідно p - та n -емітери, а зони, що межують із середнім переходом, – p - та n -бази. Вивід тиристора від крайньої зони p -типу називається анодом (A), а вивід з n -зони – катодом (C).

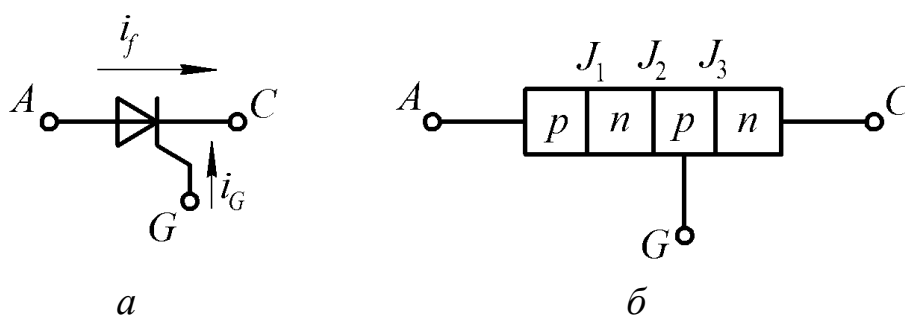


Рис. 12.4. Тиристор: а – умовне графічне позначення; б – структура

Якщо потенціал аноду тиристора вищий за потенціал катоду (пряме вмикання), переходи J_1 і J_3 зміщені в прямому напрямку (відкриті), а J_2 – у зворотному (закритий). За відсутності струму

керування прямий струм, що протікає через тиристор, у такому випадку дуже незначний (практично рівний нулю), а початкова ділянка прямої вітки ВАХ аналогічна до зворотної ділянки характеристики діоду (рис. 12.5). Тиристор залишається закритим до певного значення прикладеної прямої напруги, що називається напругою вмикання – U_{fb} . З перевищенням цього значення відбувається лавинний пробій переходу J_2 і струм тиристора миттєво зростає, тобто він вмикається. Для підтримання тиристора у відкритому стані через нього повинен протікати струм більший, ніж струм утримання I_h (рис. 12.5).

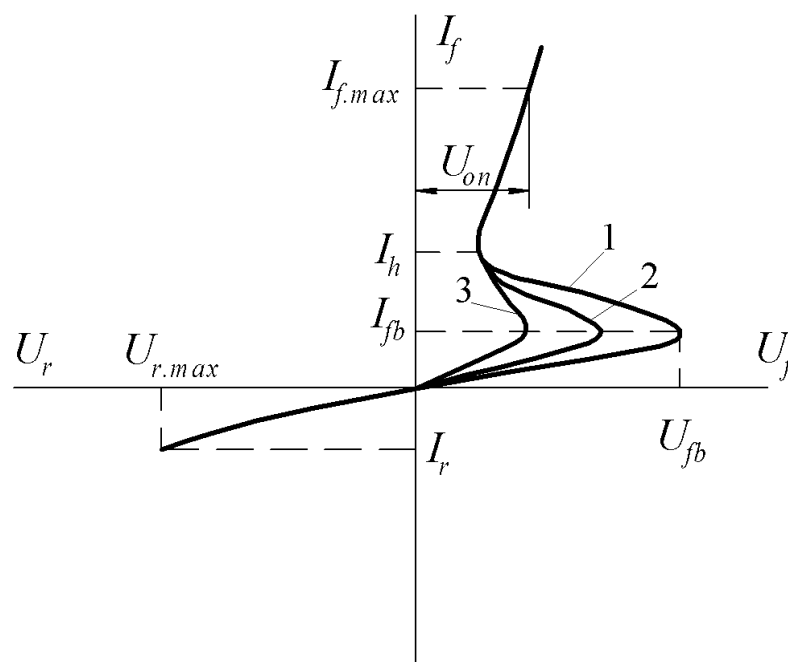


Рис. 12.5. Вольт-амперна характеристика тиристора: крива 1 для випадку коли $I_G = 0$; крива 2 для випадку $I_{G1} > 0$; крива 3 для випадку $I_{G2} > I_{G1}$

Такий спосіб вмикання тиристора погіршує його керованість та надійність і зазвичай не застосовується. У більшості випадків тиристор вмикається подачею напруги на електрод керування G (напрямок струму керування i_G має бути прямим для переходу J_3). При цьому через введення додаткових носіїв зарядів у внутрішні шари, що утворюють перехід J_2 , відбувається зменшення значення напруги відкриття тиристора. Кількість додаткових зарядів збільшується із зростанням струму керування, і за певного його

значення, яке називається струмом спрямлення, ВАХ тиристора перетворюється в характеристику звичайного діоду. Отже, за наявності струму керування тиристор аналогічно діоду вмикається і проводить струм у прямому напрямку. Після закінчення дії сигналу керування тиристор залишається ввімкнутим. Для того щоб його вимкнути, потрібно забезпечити зменшення струму через тиристор до значення меншого, ніж струм утримання I_h . Це надає тиристорі властивостей неповністю керованого ключа, оскільки його неможливо вимкнути за допомогою сигналу керування.

У разі зворотного вмикання тиристора переходи J_1 , J_3 закриті. Струм, що протікає, має невелике значення, а зворотна вітка ВАХ тиристора подібна до аналогічної ділянки характеристики діоду.

Для комутації в колах змінного струму застосовують симетричний тиристор – *симистор*, що являє собою інтегровану структуру з двох увімкнутих зустрічно-паралельно тиристорів із спільним колом керування. ВАХ симистора має пряму вітку, аналогічну прямій характеристиці тиристора (рис. 12.5). Зворотна вітка характеристики розміщена в третьому квадранті й аналогічна до прямої, тобто симистор має здатність комутувати струми різної полярності. Залежно від типу струм керування повинен бути або позитивним, або біполярним, коли полярність струму збігається з полярністю струму через симистор.

На відміну від тиристорів, які можуть залишатися ввімкненими після закінчення дії імпульсу керування, стан провідності *транзистора* триває тільки тоді (якщо не враховувати процеси комутації), коли діє сигнал керування.

За принципом дії розрізняють такі основні типи силових транзисторів: біполярні, польові та біполярні з ізольованим затвором.

Біполярний транзистор (БТ), або *bipolar junction transistor* (BJT), має три шари напівпровідника з різними типами провідності *p*- та *n*-типу, які утворюють два *p-n* переходи. Залежно від порядку чергування шарів розрізняють транзистори типу *n-p-n*, коли крайні шари є напівпровідниками з електронною провідністю, а середній –

з дірковою, та типу p - n - p , якщо навпаки (рис. 12.6). Середній шар структури називається базою (B). Зовнішній шар, що є джерелом зарядів (залежно від типу транзистора – електронів або дірок), називається емітером (E), а відповідний p - n перехід – емітерним. Ділянка, що приймає заряди, – колектор (C), а відповідний перехід називається колекторним. Кожен із шарів має виводи для з'єднання із зовнішнім колом.

Для того щоб між колектором та емітером транзистора протікав струм провідності, емітерний перехід має бути зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному. Це досягається подачею на базу транзистора типу p - n - p негативної відносно емітера напруги, а на базу транзистора типу n - p - n – позитивної. При цьому значення струму колектора залежить від струму бази, тобто БТ являється електронним ключем, що керується струмом.

Залежно від того, який із виводів транзистора є спільним для вхідного та вихідного кола, розрізняють схеми вмикання із спільною базою, спільним емітером і спільним колектором. Схема вмикання визначає підсилювальні й інші характеристики транзистора. На практиці найчастіше застосовується схема вмикання із спільним емітером.

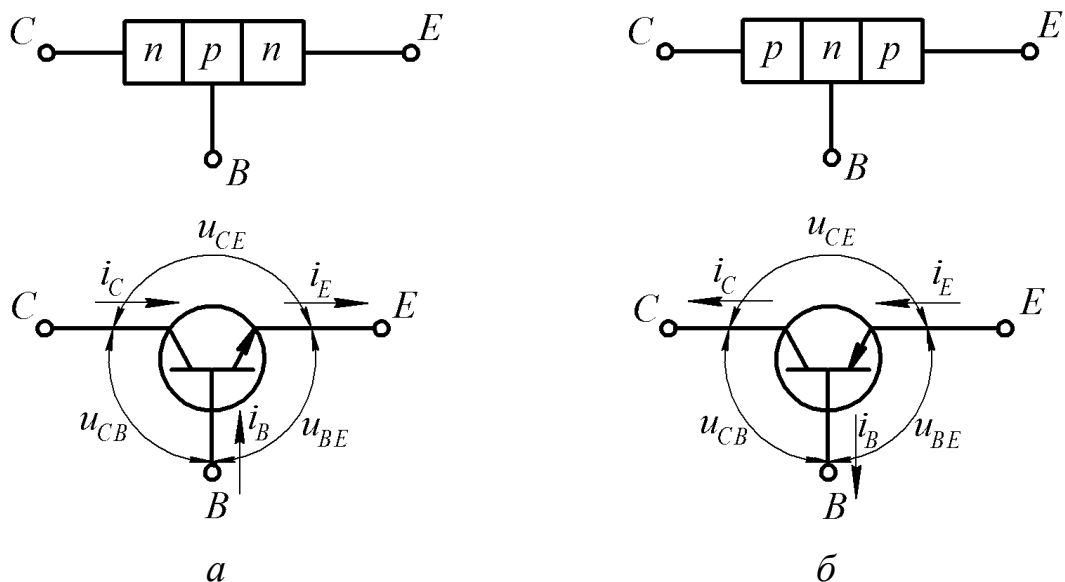


Рис. 12.6. Структура та умовне позначення біполярного транзистора: a – типу n - p - n ; $б$ – типу p - n - p

Вольт-амперні характеристики транзистора поділяються на вхідні та вихідні. Статичні вхідні характеристики (для схеми вмикання із спільним емітером) встановлюють залежність струму бази I_B від напруги між базою та емітером U_{BE} за фіксованого значення напруги між колектором та емітером $U_{CE} = \text{const}$. Вигляд цієї характеристики подібний до прямої ділянки ВАХ діоду і мало залежить від напруги U_{CE} (рис. 12.7, а).

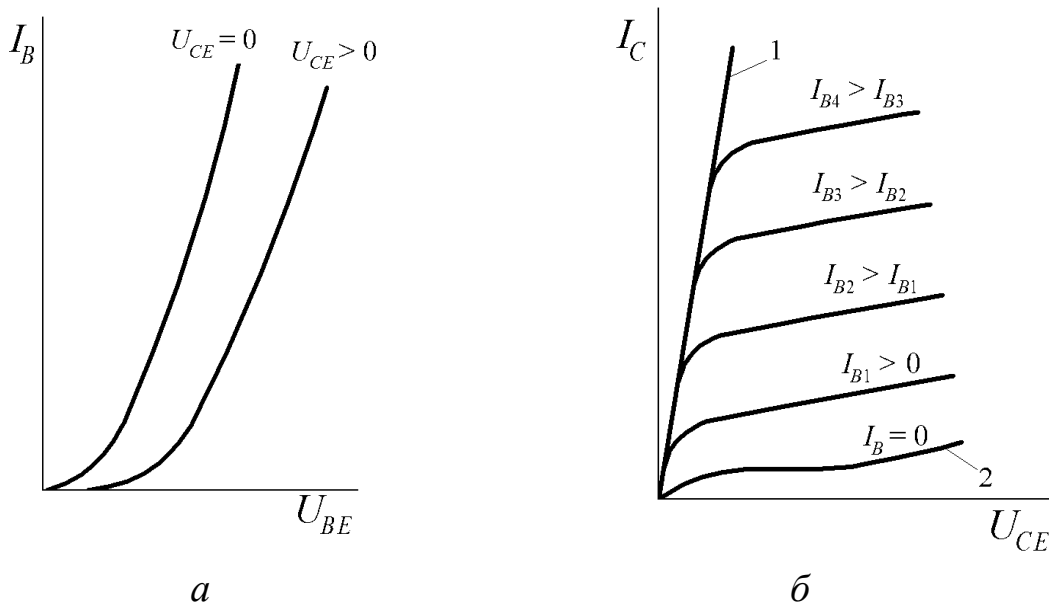


Рис. 12.7. Статичні характеристики БТ у разі вмикання зі спільним емітером: а – вхідні; б – вихідні

Статичні вихідні характеристики для тієї ж схеми вмикання (рис. 12.7, б) являють собою залежність струму колектора I_C від напруги між колектором та емітером U_{CE} . Під час роботи в ключовому режимі транзистор переходить від зони насичення (відповідає ввімкненому стану – крива 1) до зони відсікання (вимкнений стан – крива 2) і навпаки.

Основними параметрами БТ є такі: *максимально допустима постійна напруга колектор-емітер $U_{CE.max}$; максимальний постійний струм колектора $I_{C.max}$; максимальна розсіювана потужність колектора $P_{C.max}$; статичний коефіцієнт передачі струму у схемі зі спільним емітером h_{21E} – відношення постійного струму колектора до постійного струму бази; гранична частота передачі струму в разі вмикання зі спільним емітером f_{lim} – частота,*

за якої модуль коефіцієнта передачі струму в схемі зі спільним емітером зменшується до одиниці; час вмикання t_{on} та час вимикання t_{off} .

Електропровідність напівпровідників суттєво залежить від зовнішніх енергетичних впливів, а також від наявності спеціальних домішок. Керованість електропровідністю напівпровідників за допомогою температури, світла, електричного поля, механічних зусиль лежить в основі принципу дії багатьох напівпровідникових пристроїв: терморезисторів (термісторів), фоторезисторів, нелінійних резисторів (варисторів), тензорезисторів тощо.

Фоторезистори – напівпровідникові пристрої, електричний опір яких суттєво залежить від рівня освітленості. Застосовуються, наприклад, для контролю рівня рідких і сипучих тіл, для підрахунку деталей у конвеєрному виробництві, у фотокопіювальних верстатах для обробки деталей за кресленням, для світлової сигналізації, для сигналізації появи диму та контролю ступеня згоряння палива, у верстатах із програмним керуванням, у пристроях автоматичного захисту пресів холодного штампування тощо.

Терморезистори виготовляються у вигляді стрижнів, пластинок або дисків методами керамічної технології. Опір та інші властивості терморезисторів залежать не тільки від складу, але й від розміру зерна, від технологічного процесу виготовлення; тиску під час пресування (якщо напівпровідник беруть у вигляді порошку) і температури випалювання. Терморезистори використовуються для вимірювання та регулювання температури, термокомпенсації, для стабілізації напруги, обмеження імпульсних пускових струмів, вимірювання теплопровідності рідин, як безконтактні реостати і струмові реле часу. З напівпровідникової кераміки виготовляють терморезистори, які відрізняються від інших терморезисторів тим, що мають дуже значний позитивний температурний коефіцієнт опору (понад +20 %/K) у вузькому інтервалі температур (порядку 10 °C). Такі терморезистори називають позисторами. Їх виготовляють у вигляді дисків невеликої товщини й застосовують для контролю та регулювання температури, у системах пожежної

сигналізації, запобігання перевантаження двигунів, обмеження струмів, вимірювання потоків рідин і газів.

12.2. Напівпровідникові випрямляючі пристрої

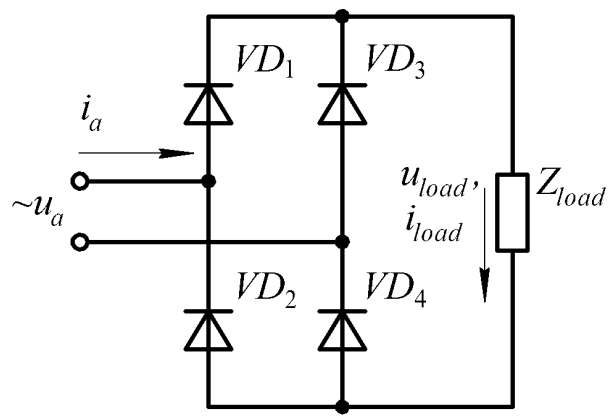
Напівпровідникові випрямлячі використовуються для перетворення змінної напруги в постійну.

У ролі ключових елементів схем випрямлення зазвичай застосовують діоди, тиристори та транзистори. Залежно від способу їх вмикання розрізняють схеми однопівперіодні, які передають до навантаження тільки одну півхвилю вхідної змінної напруги, та двопівперіодні, які випрямляють обидві півхвилі.

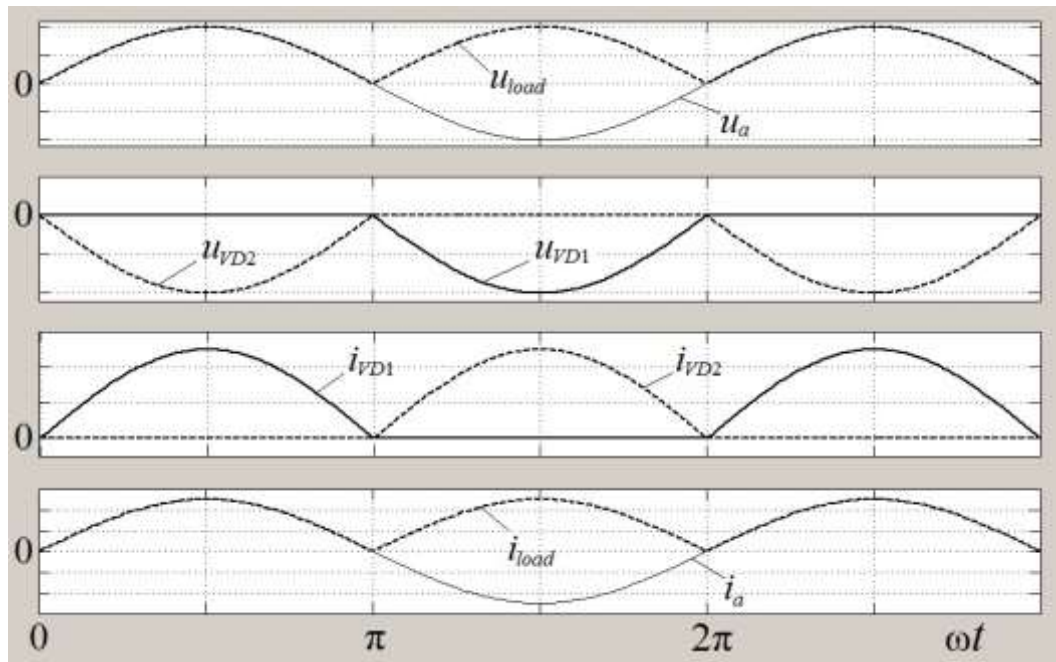
Виконання випрямлячів на керованих елементах дає змогу здійснювати не тільки випрямлення змінної напруги, а й регулювання та стабілізацію вихідної постійної напруги або струму. Такі випрямлячі належать до керованих, на відміну від некерованих, вихідна напруга яких не регулюється.

Двопівперіодну мостову схему наведено на рис. 12.8, *а*. Вона містить дві пари з'єднаних послідовно діодів. Кожна пара утворена одним діодом з катодної групи (групи діодів приєднаних катодом до навантаження) і одним – з анодної. У будь-який момент часу в катодній групі проводить струм діод, на аноді якого буде найбільший потенціал, а в анодній групі – діод, на катоді якого буде найменший потенціал. Кожний діод проводить струм протягом половини періоду.

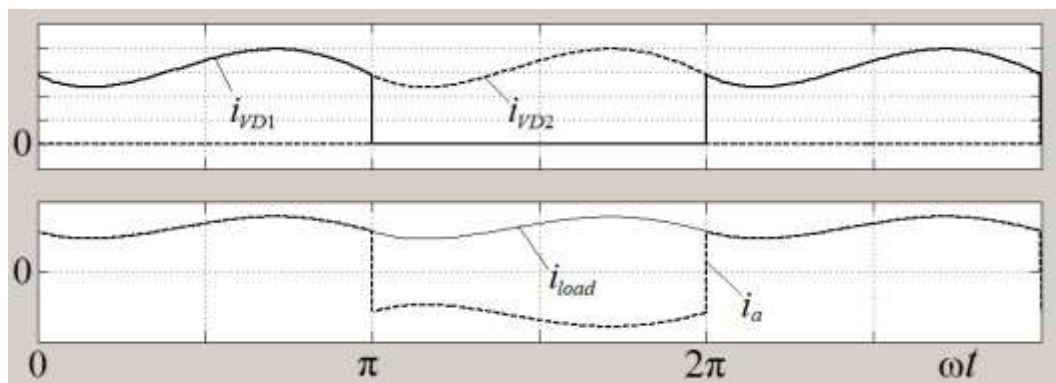
У разі суто активного навантаження під час позитивного півперіоду струм навантаження i_{load} протікає через діоди VD_1 , VD_4 , а діоди VD_2 , VD_3 закриті зворотною для них напругою. Після зміни полярності вхідної напруги відкриваються діоди VD_2 , VD_3 , а діоди VD_1 , VD_4 закриваються. Отже, струм навантаження, повторюючи за формою вихідну напругу u_{load} , протікає протягом обох півперіодів змінної вхідної напруги (рис. 12.8, *б*).



a



б



в

Рис. 12.8. Двопівперіодний мостовий випрямляч: *a* – принципова схема; *б* – осцилограми напруг та струмів за суто активного навантаження, *в* – осцилограми струмів за активно-індуктивного навантаження

Середнє значення вихідної напруги випрямляча визначиться виразом

$$U_{av.load} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_m}{\pi} = 0,637U_m. \quad (12.1)$$

Діюче значення вихідної напруги для двопівперіодної схеми дорівнює

$$U_{load} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad (12.2)$$

тоді коефіцієнт пульсацій становитиме

$$RF = \sqrt{\left(\frac{U_{load}}{U_{av.load}}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} = 0,483. \quad (12.3)$$

За активно-індуктивного характеру навантаження вихідний струм випрямляча згладжується. Проте струм через діоди та струм живлення i_a , піддаються різким перемиканням (рис. 12.8, в).

12.3. Інвертори

Процес перетворення постійного струму в змінний називається інвертуванням, а відповідний перетворювач, який здійснює передачу енергії від кола постійного струму до кола змінного, – *інвертором*.

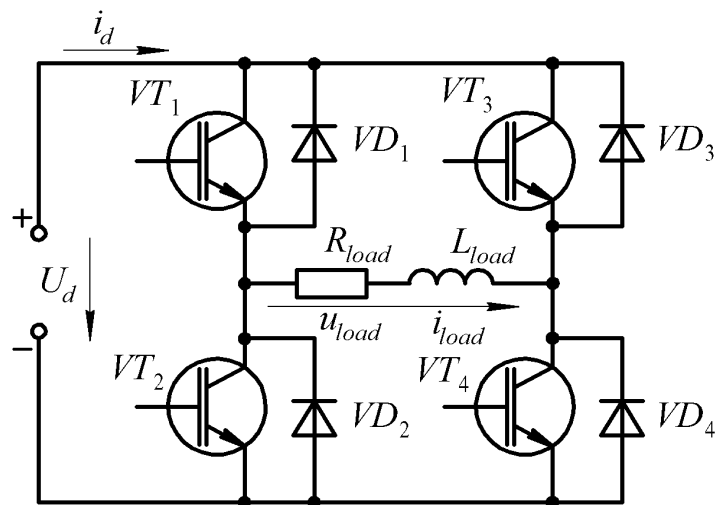
Розрізняють інвертори, *ведені мережею*, у яких комутація силових ключів здійснюється згідно з параметрами наявної мережі змінного струму, і *автономні інвертори*, що працюють на автономне навантаження. Параметри напруги останніх визначаються схемою перетворення, системою керування й режимом роботи.

За характером електромагнітних процесів автономні (незалежні) інвертори поділяються на *інвертори напруги (AІН)*, *інвертори струму (AІС)*, а також *резонансні інвертори*: у тому сенсі, що в перших двох типах інвертор являє собою джерело напруги або струму, а в останньому навантаження входить до

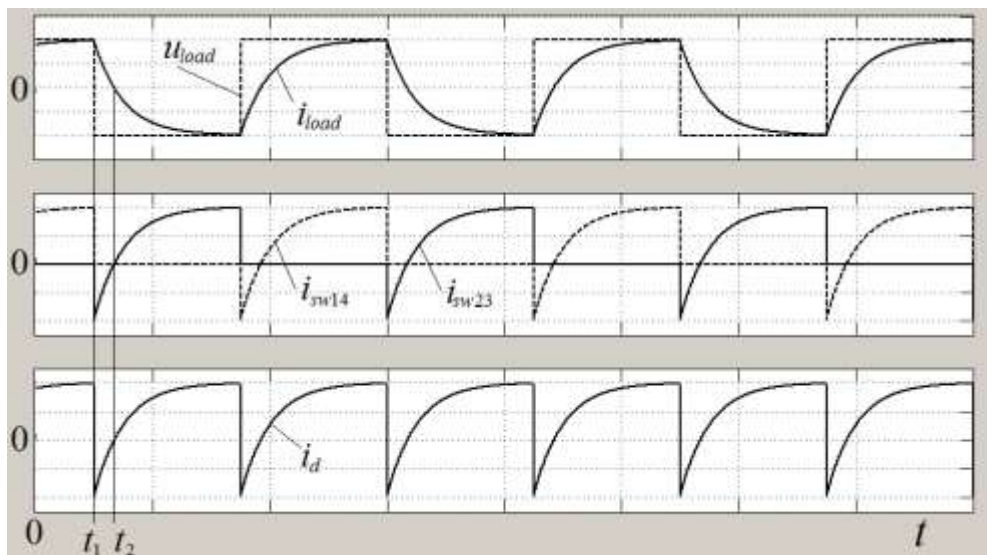
складу коливального контуру і струм силових ключів має коливальний характер протягом інтервалу їх провідності.

В автономних інверторах напруги внаслідок перемикання СК, формується задана схемою керування напруга, а форма та фаза струму залежать від параметрів навантаження.

Схеми автономних інверторів найчастіше будують на транзисторах або керованих тиристорах. На рис. 12.9, а показано схему однофазного мостового АІН на транзисторах IGBT, зашунтованих у зворотному напрямку діодами. Навантаження має активно-індуктивний характер.



а



б

Рис. 12.9. Однофазний мостовий інвертор напруги:
а – принципова схема; б – осцилограми струму i_{load} та напруги u_{load} в навантаженні, струму ключів i_{sw14} , i_{sw23} , струму джерела i_d

Транзистори в цій схемі працюють попарно, тобто в будь-який момент часу відкритий один транзистор з одного плеча і один – з іншого. Коли відкриті транзистори VT_1 , VT_4 , напруга навантаження u_{load} має полярність, показану на рис. 12.9, *а* стрілкою. Струм навантаження i_{load} зростає зі швидкістю, яка залежить від параметрів навантаження (R_{load} , L_{load}). У момент часу t_1 подаються імпульси керування на закривання транзисторів VT_1 , VT_4 та відкривання транзисторів VT_2 , VT_3 (рис. 12.9, *б*). Унаслідок дії ЕРС самоіндукції навантаження після закривання VT_1 , VT_4 струм у навантаженні продовжує протікати в тому ж напрямку, але вже через діоди VD_2 , VD_3 . Вмикання діодів супроводжується зміною полярності напруги в навантаженні u_{load} на протилежну. Під дією зустрічної напруги струм навантаження зменшується. У момент часу t_2 (перехід струму через нуль) діоди VD_2 , VD_3 вимикаються і струм навантаження починає протікати через транзистори VT_2 , VT_3 , які відкриваються. Цей процес періодично повторюється, і в навантаженні формується змінна напруга прямокутної форми.

На осцилограмах струмів ключів $i_{sw14} = i_{sw1} = i_{sw4}$, $i_{sw23} = i_{sw2} = i_{sw3}$ (рис. 12.9, *б*) додатні значення відповідають струмам, що протікають через транзистори, і при цьому енергія віддається джерелом постійного струму, а від’ємні – струмам, що протікають через шунтувальні діоди, і енергія передається до джерела. У випадку, якщо джерело постійного струму має односторонню провідність (наприклад випрямляч), його потрібно зашунтувати конденсатором для приймання енергії, що повертається з мережі змінного струму.

12.4. Перетворювачі частоти змінної напруги

Перетворювачами частоти називають пристрої призначені для перетворення змінної напруги однієї частоти в змінну напругу іншої частоти.

Структурну схему перетворювача з проміжною ланкою постійного струму показано на рис. 12.10. У ньому змінна напруга мережі живлення з частотою f_1 випрямляється випрямлячем B і фільтрується від пульсацій фільтром Φ . З виходу фільтру напруга подається на автономний інвертор AI для інвертування з частотою f_2 .

У перетворювачах, які живляться від промислової мережі, випрямляч найчастіше виконують за трифазною мостовою схемою. Для зменшення пульсацій на виході випрямляча встановлюється фільтр. Під час роботи на активно-індуктивне навантаження фільтр також може виконувати функцію рекуперації енергії до джерела постійного струму.

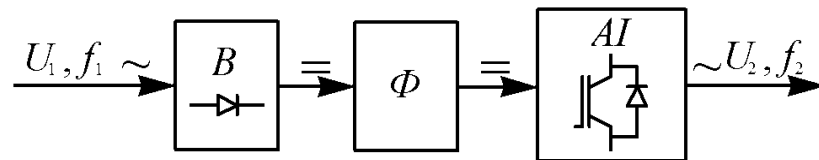


Рис. 12.10. Структурна схема перетворювача з проміжною ланкою постійного струму

Схемна реалізація ланки AI залежить від вимог, що ставляться до перетворювача. Зазвичай перетворювачі високої частоти ($f_2 > 400$ Гц) і з жорсткими вимогами до якості вихідної напруги виконуються за схемами інвертора струму або резонансного інвертора. У перетворювачах, що застосовуються в електроприводах ($f_2 = 50$ Гц), автономний інвертор виконують найчастіше за схемою інвертора напруги. Для покращення якості напруги таких інверторів можуть застосовуватися синусні фільтри або спеціальні алгоритми ШІМ.

Вихідна частота перетворювача не залежить від частоти мережі і може бути як вища, так і нижча за частоту мережі живлення. Регулювання вихідної напруги може здійснюватись або на стадії випрямлення, або інвертування. У першому випадку випрямляч має бути керованим і значення вихідної напруги визначається кутом керування СК. У другому – випрямляч

виконується некерованим, а напруга регулюється зміною коефіцієнту модуляції інвертора.

До недоліків такого типу перетворювачів належить подвійне перетворення енергії, що призводить до зниження ККД пристрою.

Запитання для самоперевірки

1. Назвіть основні напівпровідникові елементи.
2. Опишіть структуру напівпровідникового діода та його ВАХ.
3. Поясніть принцип роботи тиристора.
4. Назвіть типи біполярних транзисторів, опишіть принципи їх роботи.
5. Наведіть основні параметри біполярних транзисторів.
6. Поясніть призначення та принцип роботи напівпровідникових випрямлячів.
7. Поясніть призначення та принцип роботи інверторів.
8. Поясніть призначення та принцип роботи перетворювачів частоти змінної напруги

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Будіщев М. С.* Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник для студ. вищ. навч. закладів. – Львів : Афіша, 2001. – 423 с.
2. *Городжа А. Д.* Загальна електротехніка : навчальний посібник. – Київ : КНУБА, 2000. – 248 с.
3. *Електротехніка у будівництві* : підручник / А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін, В. М. Охріменко та ін. ; за ред. В.М. Охріменка. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 384 с.
4. *Матвійчук А. Я., Стінянський В. Л.* Електротехніка : навчально-методичний посібник. – Вінниця : Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського, 2017. – 270 с.
5. *Мілих В. І.* Електротехніка та електромеханіка : навч. посіб. для студ. вищ. закладів освіти. – Київ : Караван, 2005. – 375 с.
6. *Паначевний Б. І.* Курс електротехніки. – Харків : Торнадо, 1999. – 287 с.
7. *ДСТУ 3120-95.* Електротехніка. Літерні позначення основних величин. – [Чинний від 07.01.1996]. – Київ : Держстандарт України, 1996. – 40 с.
8. *ДСТУ 2818-94 (ГОСТ 30149-95).* Машини електричні обертові. Позначення літерні та одиниці виміру. – [Чинний від 07.01.1996, на заміну ГОСТ 30149-95]. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 15 с.

Навчальне видання

БОНДАР Роман Петрович,
ГОЛЕНКОВ Геннадій Михайлович

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Конспект лекцій

Редагування та коректура *Т. В. Івченко*
Комп'ютерне верстання *Л. В. Лабунець*

Підписано до друку 29.02.2024. Формат 60×84_{1/16}

Ум. друк. арк. 10,0. Обл.-вид. акр. 10,75.

Електронний документ. Вид. № 1/І-24

Видавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, 03037

Свідцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002