

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

В. Ф. Болюх, В. Г. Данько, Є. В. Гончаров

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ,
ЕЛЕКТРОНІКИ
ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

За редакцією В. Г. Данька

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол № 2 від 24.05.2018 р.

Харків
Планета-Прінт
2019

УДК 621.3:621.38(075)
Б 79

Рецензенти:

Б. В. Клименко, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

В. Є. Плюгін, д-р техн. наук, проф., Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова;

Ю. В. Батигін, д-р техн. наук, проф., Харківський національний автомобільно-дрожній університет

Болюх В. Ф.

Б 79 Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки : навч. посіб. / В. Ф. Болюх, В. Г. Данько, Є. В. Гончаров; за ред. В. Г. Данька ; НТУ «ХП». – Харків : Планета-Прінт, 2019. – 248 с.

ISBN

У навчальному посібнику розглянуто основи теорії електричних кіл постійного та змінного струму, основні поняття і закони магнітних кіл; розглянуто конструкцію, принцип дії та характеристики електротехнічних пристроїв (трансформаторів, електричних машин постійного і змінного струму); фізичні основи електронної техніки, будову і принцип дії основних напівпровідникових приладів, роботу основних електронних пристроїв, таких як джерела вторинного живлення, електронні підсилювачі, елементи імпульсної, цифрової і мікропроцесорної техніки.

Призначено для студентів електричних та неелектричних спеціальностей.

Іл. 209. Табл. 8. Бібліогр.: 28 назв.

ISBN

УДК 621.3:621.38(075)
© В. Ф. Болюх, В. Г. Данько,
Є. В. Гончаров, 2019 р.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

А	– Анод
АЛП	– Арифметико-логічний пристрій
Б	– База
В	– Витік
ВГ	– Вентильна група
ВН	– Вища напруга
ВСП	– Вузькосмуговий (вибірковий) підсилювач
Г	– Генератор
ГІ	– Генератор тактових імпульсів
Д	– Двигун
ДВЖ	– Джерело вторинного живлення
Е	– Емітер
ЕМ	– Електрична машина
ЕРС	– Електрорушійна сила
З	– Затвор
ЗП	– Запам'ятовувальний пристрій
ЗФ	– Згладжуючий фільтр
ІВВ	– Інтерфейс введення-виведення
ІМС	– Інтегральна мікросхема
К	– Катод
КЕ	– Керуючий елемент
КЗ	– Коротке замикання
ККД	– Коефіцієнт корисної дії
КОП	– Код операції
МЗС	– Машина змінного струму
МП	– Мікропроцесори
МПК	– Мікропроцесорні комплекти
МПС	– Машина постійного струму
НН	– Нижча напруга

НХ	– Неробочий хід
ОЗН	– Обмотка незалежного збудження
ОЗП	– Оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОЗС	– Обмотка серієсного збудження
ОЗШ	– Обмотка шунтованого збудження
ПВВ	– Пристрої введення-виведення
ПВЧ	– Підсилювач високої частоти
ПЕ	– Підсилюючий елемент
ПЗП	– Постійний запам'ятовувальний пристрій
ПКДП	– Програмований контролер прямого доступу до пам'яті
ПКП	– Програмований контролер переривань
ПНЧ	– Підсилювач низької частоти
ППІ	– Програмований паралельний інтерфейс
ППС	– Підсилювач постійного струму
С	– Стік
СБ	– Спільна база
СЕ	– Спільний емітер
СК	– Спільний колектор
Ст	– Стабілізатор постійної напруги
ТН	– Трансформатор напруги
Тр	– Трансформатор
ТС	– Трансформатор струму
УП	– Управляючий пристрій
ЦП	– Центральний процесор
ШСП	– Широкодіапазонний підсилювач

ВСТУП

Цій навчальний посібник призначається для студентів неелектротехнічних спеціальностей, тому автори, в першу чергу, вважали за доцільне у доступній, а місцями спрощеній формі, викласти все те, що пов'язано з електротехнікою, електронікою та мікропроцесорною технікою, які великою мірою базуються на загальних законах і поняттях.

Знання електротехніки потрібне тому, що вона спрямована на практичне використання електроенергії: її отримання, передачу, розподіл і споживання.

Основними перевагами електроенергії перед іншими видами енергії, що забезпечують її широке практичне використання є:

- універсальність, тобто можливість отримання з будь-яких інших видів енергії (хімічної, механічної, теплової, сонячної, ядерної та ін.) та, навпаки, можливість перетворення в інший вид енергії;
- можливість економічної, без великих втрат, передачі на практично необхідну відстань, розподіл та споживання у будь-якій кількості;
- надійність, відносна простота обслуговування, постійна готовність до дії;
- екологічність та високі техніко-економічні показники електричних машин та апаратів електроустаткування;
- можливість на базі електрифікації повної механізації та автоматизації виробництва.

Носієм електроенергії є електричні заряди у взаємодії з нероздільним електромагнітним полем, складові якого можуть проявлятися на різному рівні.

Електроніка й мікропроцесорна техніка вивчає фізичні явища, пов'язані з пересуванням заряджених частин (переважно, електронів) у вакуумі і різного роду кристалічних структурах, а також будову і характеристики приладів, пристроїв і систем, побудованих на основі цих фізичних явищ.

Фізичні закони і поняття, що покладені в основу тих чи інших конкретних застосувань, будуть подаватися у прямій або спрощеній формі.

В електротехніці широко використовуються провідникові, ізоляційні, напівпровідникові та магнітні (ферромагнітні) матеріали.

Провідникові матеріали мають значну електропровідність і тому використовуються в якості провідників електричного струму. Основним матеріалом для проводів та кабелів являються мідь та алюміній, які є стійкими до корозії, мають високу електропровідність, пластичність та достатню механічну міцність. Для виготовлення нагрівальних приладів, резисторів застосовуються електропровідникові сплави з відносно великим питомим опором: константан, нейзильбер, ніхром, хромаль та ін.

Електроізоляційні матеріали – це діелектрики, які використовуються як ізолятори електроустановок. За їх допомогою ізолюються дроти, кабелі, провідники та струмопровідні частини електричного обладнання. До цих матеріалів належать: папір, бавовно-паперові матеріали, резина, ебоніт, лаки, полімери, пластмаси, скло, слюда, азбест, керамічні матеріали, повітря та ін.

Електричні властивості та якість ізоляційних матеріалів визначаються їх великим питомим опором, теплостійкістю, електричною міцністю та абсолютною діелектричною проникливістю.

Напівпровідникові матеріали за рівнем провідності знаходяться посередині між провідниковими і ізоляційними. До них належать хімічні елементи III, IV, V та VI валентних груп (індій, кремній, германій, фосфор, селен та ряд інших), а також цілий ряд сполук типу оксидів міді Cu_2O і ZnO , арсеніду галію $GaAs$, карбіду кремнію SiC та інші. Найбільш поширені серед цих напівпровідників – кремній Si (до 90 %) та германій

Ge, які використовуються для виготовлення діодів, транзисторів, мікросхем і т.п.

Магнітні – (феромагнітні) матеріали поділяються на такі три групи. *Магнітопровідні* для постійних і змінних магнітних потоків, які включають технічне залізо (електротехнічні сталі), низьковуглецеві сталі, листові електротехнічні сталі, сплави з високою проникністю (пермалої). *Магнітотверді*, які використовуються для виготовлення постійних магнітів. Це сплави на основі нікелю, кобальту, самарію та інших з високими значеннями коерцитивної сили і залишкової намагніченості. *Матеріали з високою магнітострикцією* (ферити) широко вживаємі в інформаційній і обчислювальній техніці.

Навчальний посібник призначений для студентів неелектричних спеціальностей для вивчення дисциплін: «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка»; «Електротехніка та електромеханіка»; «Електротехніка та електроніка».

Навчальний посібник містить вступ, перелік умовних скорочень, список літератури, відомості про авторів і розділи:

1) Основи аналізу електричних кіл; 2) Електричні кола однофазного синусоїдного змінного струму; 3) Трифазні електричні кола; 4) Перехідні процеси в електричному колі; 5) Магнітне поле в електротехнічних пристроях; 6) Електромагнітні пристрої; 7) Трансформатори; 8) Електричні машини; 9) Електричні машини постійного струму; 10) Електричні машини змінного струму; 11) Електроніка; 12) Джерела вторинного живлення; 13) Електронні підсилювачі; 14) Елементна база мікроелектроніки; 15) Елементи цифрової і мікропроцесорної техніки; 16) Основні поняття про мікропроцесорну техніку.

Розділ 1

ОСНОВИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

1.1. Загальні поняття електричних кіл

Електричним колом називається сукупність джерел електричної енергії та її споживачів, з'єднаних між собою таким чином, що утворюються шляхи для проходження електричного струму. Розрізняють електричні кола постійного і змінного струмів. Електричне коло характеризується такими параметрами, як струм, напруга, електрорушійна сила (ЕРС).

Струм – це рух електричних зарядів. Чисельно він дорівнює кількості електричних зарядів, що проходять на ділянці електричного кола за одиницю часу:

$$I = \frac{Q}{t},$$

де Q – кількість електричних зарядів, що пройшли за час t .

Струм позначається літерами i (миттєве значення) та I (постійний струм або діюче значення змінного струму).

Миттєве значення струму дорівнює $i = \frac{dq}{dt}$.

Вимірюється струм в *амперах* [А]: $1 \text{ А} = \frac{\text{Кул}}{\text{с}}$.

Напруга – це різниця потенціалів електричного поля, що може призводити до руху електричних зарядів. Чисельно напруга дорівнює роботі, що потрібна для пересування одного електричного заряду. Напруга позначається літерами u (миттєве значення) та U (постійний струм або діюче значення змінного струму).

Вимірюється напруга в *вольтах* [В]: $1 \text{ В} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кул}}$.

ЕРС – це різниця потенціалів на виході джерела електричної енергії, що утворюється внаслідок дії сторонніх сил (наприклад, дизеля або турбіни, що обертає електрогенератор). Чисельно ЕРС дорівнює роботі, що витрачається на пересув одного електричного заряду в джерелі електричної енергії. ЕРС позначається літерами *e* (миттєве значення) та *E* (постійний струм або діюче значення змінного струму).

Вимірюється ЕРС, як і напруга, в *вольтах* [В].

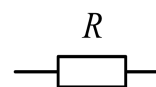
1.1.1. Основні функціональні елементи електричного кола

- 1) Джерела електричної енергії (електрогенератори, акумулятори, хімічні батареї, сонячні батареї та ін.);
- 2) Споживачі (механічні, теплові, освітлювальні, інформаційні та багато ін.);
- 3) Лінії електропередач (магістральні, виробничі, комунальні, з'єднання в різного роду пристроях і системах та багато інших);
- 4) Перетворювачі електричної енергії (трансформатори, випрямлячі, інвертори та їх можливі комбінації);
- 5) Електричні апарати (контактні, комутаційні, захисні, регуляційні та інші);
- б) Електровимірювальні прилади (вольтметри, амперметри, фазометри, лічильники та інші).

1.1.2. Загальні параметри функціональних елементів

Електричні властивості будь-якого функціонального елемента електричного кола можуть бути охарактеризовані за допомогою таких параметрів, як резистивний опір, індуктивність, ємність. Різною мірою вони завжди наявні у всіх елементах електричного кола, але один із цих параметрів може бути головним, а інші проявлятимуться набагато слабше.

Резистивний опір *R*. Умовне позначення на схемах
рис. 1.1. Одиниця вимірювання опора *ом* [Ом].



Резистивний опір характеризує втрати електричної енергії при проходженні струму крізь функціональні елементи електричного кола. Чисельно це відповідає закону Ома:

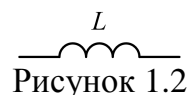
$$U = R I .$$

Найбільш повно цей параметр присутній у резисторах, обмотках різного роду котушок, лініях електропередач. Наприклад, резистивний опір обмотки котушки розраховується таким чином:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де ρ – питомий опір матеріалу проводу; l – його довжина; S – переріз.

Індуктивність L . Умовне позначення на схемах рис. 1.2. Одиниця вимірювання *генрі* [Гн].



Індуктивність характеризує здатність утворювати магнітний потік, зчеплений з функціональним елементом електричного кола, при проходженні крізь нього струму. Чисельно це визначається таким чином:

$$\Psi = LI,$$

де $\Psi = w \Phi$ – потокозчеплення (w – кількість витків котушки; Φ – утворений нею магнітний потік).

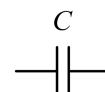
Найбільш повно цей параметр присутній у котушках електричних машин, трансформаторів, різного виду електричних апаратів, дроселях і т.п. Індуктивність котушки з осердям (або без нього):

$$L = \mu_a \frac{w^2}{l} S,$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність матеріалу осердя; S і l – його переріз і довжина.

У свою чергу, $\mu_a = \mu_r \mu_0$, де μ_r – відносна магнітна проникність (для магнітних матеріалів $\mu_r \gg 1$; для вакууму, повітря й немагнітних матеріалів $\mu_r = 1$), $\mu_0 = 1,24 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна стала.

Ємність C . Умовне позначення на схемах рис. 1.3. Одиниця вимірювання *фарада* [Ф].



Ємність характеризує здатність функціонального елемента електричного кола накопичувати електричні заряди під впливом прикладеної до нього напруги. Чисельно це визначається таким чином:

$$Q = C U.$$

Найбільш повно цей параметр присутній у різного роду конденсаторах, розрахувати ємність яких можна за формулою:

$$C = \epsilon_a \frac{S}{d},$$

де ϵ_a – абсолютна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу між облатками конденсатора; S – площа поверхні облаток; d – відстань між ними.

У свою чергу, $\epsilon_a = \epsilon_r \epsilon_0$, де ϵ_r – відносна діелектрична проникність (для діелектричних матеріалів $\epsilon_r > 10$; для вакууму, повітря $\epsilon_r = 1$); $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала.

1.1.3. Подання електричного кола у вигляді електричних схем

Електричні схеми, що відповідають конкретному електричному колу, можуть бути 3-х видів: графічні, принципіві, заміщення.

Графічна схема подає електричне коло у вигляді, наближеному до реального, не тільки в зображенні окремих функціональних елементів, а й у їх взаємному розташуванні. Вона потрібна для наочного уявлення структури електричного кола, взаємозв'язків у ньому, подає можливість швидко зорієнтуватись у разі необхідності будь-яких оперативних і технологічних робіт.

Принципова схема подає зв'язок між функціональними елементами, які подаються умовними позначеннями відповідно до держстандарту. Таку схему набагато простіше виконати, ніж графічну, у той же час вона надає повну інформацію про побудову електричного кола, потрібну комплектацію, сприяє проведенню монтажу. Вона є невід'ємною частиною технічної документації.

Схема заміщення призначена для проведення розрахунків електричного кола, визначення струмів у ньому й напруг на окремих функціональних елементах, які подаються через параметри R, L, C . Тобто реальний функціональний елемент заміщається його найхарактернішими параметрами.

Приклад такої схеми заміщення для кола постійного струму, у функціональних елементах якого проявляються тільки параметри E , I , U і R , наведено на рис. 1.4. У цьому колі діють джерела електричної енергії E_1 і E_2 та її споживачі: R_1 , R_2 – втрати в джерелах електричної енергії; R_3 , R_4 , R_5 , R_6 – лінії електропередач; R_7 – електрообігрівач; R_8 , R_9 – електричні лампи.

1.1.4. Геометричні поняття електричного кола

До цих понять відносяться:

– *вітка* – ділянка електричного кола, по якій проходить однаковий струм (наприклад, по ділянці від b до a крізь R_4 , R_1 , E_1 і R_3 проходить однаковий струм I_1 (рис. 1.4), тому вона є віткою);

– *вузол* – місце з'єднання 3-х і більше віток (a , b , c , d);

– *контур* – будь-який замкнений шлях в електричному колі (напри-

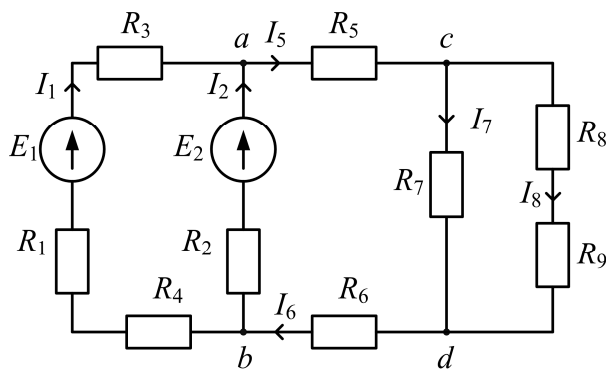


Рисунок 1.4

клад, контур утворюється при проходженні крізь R_4 , R_1 , E_1 , R_3 , E_2 , R_2 або при проходженні крізь R_4 , R_1 , E_1 , R_3 , R_5 , R_7 , R_6 , або ще іншим можливим шляхом).

Відзначаються *незалежні вузли* і *контури*, до складу яких входить хоча б одна нова вітка.

1.1.5. Умовно-позитивні напрямки електричних величин

Знаки ЕРС та напруг залежать від напрямку переміщення позитивних зарядів, що протилежні до напрямку руху електронів.

Напрямок струму визначається напрямком руху зарядів на ділянці кола. Тому електричні величини являються нібито «направленими». На електричних схемах полярності напруг звичайно позначаються знаками «+» та «-». На схемах заміщення позитивні напрямки ЕРС, напруг та струмів позначаються стрілками. За позитивний напрямок струму I вважають напрям руху позитивних зарядів: поза джерелом – від полюса «+»

до «—». Оскільки напрям руху співпадає з напрямом ЕРС джерела та з напрямом напруги на пасивній ділянці кола, на схемах заміщення в джерелі стрілку, що показує позитивний напрямок ЕРС, направляють від негативного полюса до позитивного, а стрілку, що показує напрям напруги, — в зворотному напрямку (рис. 1.5).

Схеми електричних кіл часто зображують спрощено — без джерела електроенергії, зазначаючи напругу, що відводиться до входних полюсів електричного кола від джерела. Реально такими полюсами є виводи електричного генератора або іншого джерела, або контакти на силових щитах, розетки. При цьому необхідно пам'ятати, що електричне коло залишається замкненим через джерело.

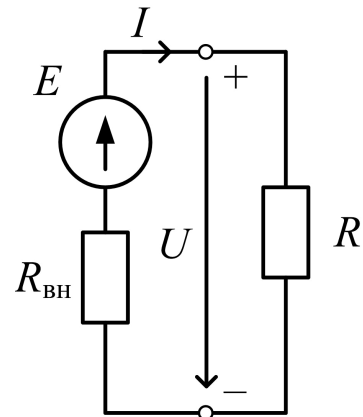


Рисунок 1.5

1.2. Електричні кола постійного струму

Це такі електричні кола, ЕРС, напруга і струм в яких незмінні у часі і за напрямом.

1.2.1. Закони Ома і Кірхгофа у колі постійного струму

За законом Ома на пасивній ділянці електричного кола з опором R (рис. 1.5) струм I пропорційний напрузі U , а також $I = \frac{U}{R} = GU$, де провід-

ність цієї ділянки електричного кола $G = \frac{1}{R}$. Провідність вимірюється в *сименсах* [См].

1-й закон Кірхгофа (для вузла): алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю (сума струмів, що входять у вузол, дорівнює сумі струмів, що виходять з вузла).

Наприклад (див. рис. 1.4), для вузла «а»: $I_1 + I_2 - I_5 = 0$ або $I_1 + I_2 = I_5$.

2-й закон Кірхгофа (для контура): відповідно до вибраного напрямку обходу контура алгебраїчна сума ЕРС у контурі дорівнює алгебраїчній сумі напруг у контурі.

ЕРС беруться зі знаком «+», якщо напрям обходу контура співпадає з напрямом ЕРС, і зі знаком «-», якщо вони зустрічні.

Напруги $U = R I$, або напруги в місцях розриву контура, беруться зі знаком «+», якщо напрям напруги співпадає з напрямом обходу контура, і зі знаком «-», якщо вони зустрічні.

Наприклад (рис. 1.4), при обході контура $R_4 \rightarrow R_1 \rightarrow E_1 \rightarrow R_3 \rightarrow E_2 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4$ за годинниковою стрілкою $E_1 - E_2 = R_4 I_1 + R_1 I_1 + R_3 I_1 - R_2 I_2$.

Розрізняють *прості* і *складні* електричні кола. До *простих* належать такі, у яких джерела ЕРС знаходяться в одній вітці (рис. 1.6, а, б). *Складне* електричне коло – таке, яке має не менш двох джерел ЕРС, розташованих у різних вітках (див. рис. 1.4).

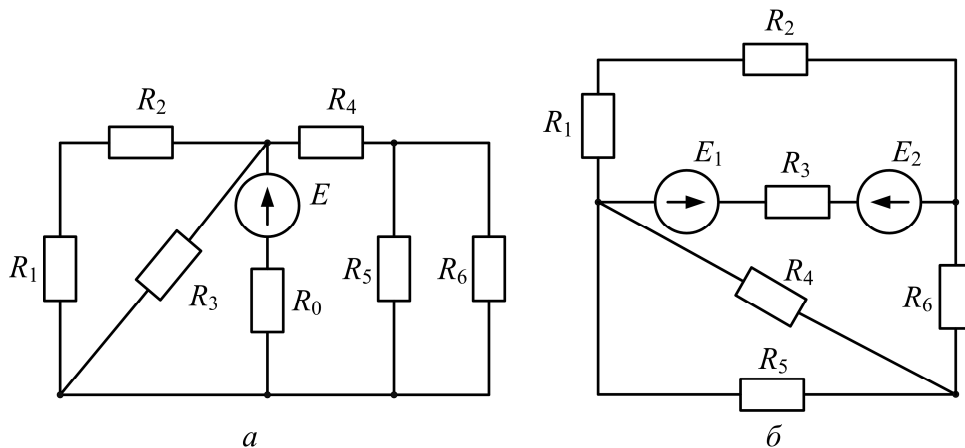


Рисунок 1.6

Розрахунок простих електричних кіл доречно проводити за допомогою еквівалентних перетворень. Розрахунок складних електричних кіл потребує або прямого використання законів Кірхгофа, або інших методів, заснованих на цих законах. При потребі визначення струму крізь одного окремого споживача доцільно використовувати метод еквівалентного генератора.

1.2.2. Еквівалентні перетворення

Еквівалентні перетворення – це заміна групи опорів одним опором або іншою групою опорів таким чином, що напруги й струми в місцях приєднання групи залишаються незмінними.

При *послідовному* з'єднанні опорів (рис. 1.7, а) за другим законом Кірхгофа: $U = R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) I$.

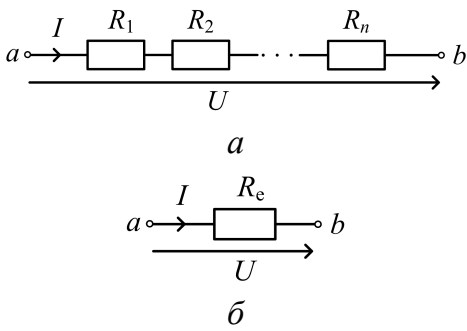


Рисунок 1.7

Для R_e (рис. 1.7, б): $U = R_e I$.

За умови збереження U і I незмінними отримуємо:

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_1^n R_k.$$

При *паралельному* з'єднанні опорів (рис. 1.8, а) за першим законом Кірхгофа $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$. Для R_e (рис. 1.8, б):

$I = U / R_e$, у той час як $I_k = U / R_k$. Тому

$$\frac{U}{R_e} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}.$$

Скорочуючи U , отримуємо:

$$R_e = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{R_k}}.$$

Якщо замість опорів оперувати провідностями $G = 1 / R$, то еквівалентна провідність буде:

$$G_e = \sum_1^n G_k.$$

Для двох паралельно

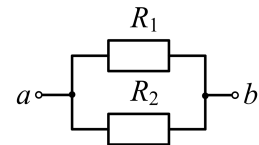


Рисунок 1.9

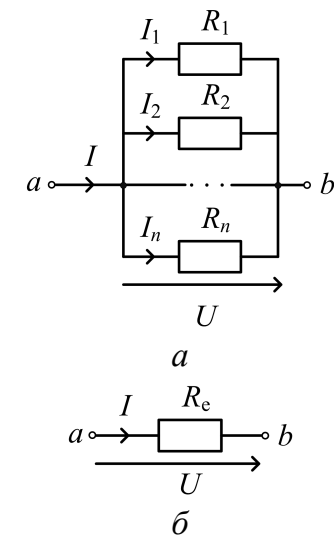


Рисунок 1.8

з'єднаних опорів (рис. 1.9) буде:

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

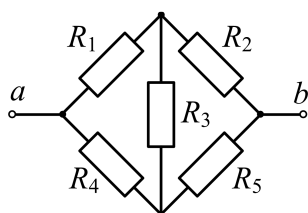


Рисунок 1.10

При наявності в електричному колі «мостових» з'єднань (рис. 1.10) виникає потреба заміни груп, з'єднаних «трикутником» ($R_1 R_3 R_4$; $R_2 R_3 R_5$) або «зіркою» ($R_1 R_3 R_2$; $R_4 R_3 R_5$), на протилежні групи з метою переходу до паралельно-послідовного з'єднання.

Розглянемо еквівалентний зв'язок між такими групами (рис. 1.11), поперемінно приєднуючи їх до вузлів: a, b ; b, c ; c, a .

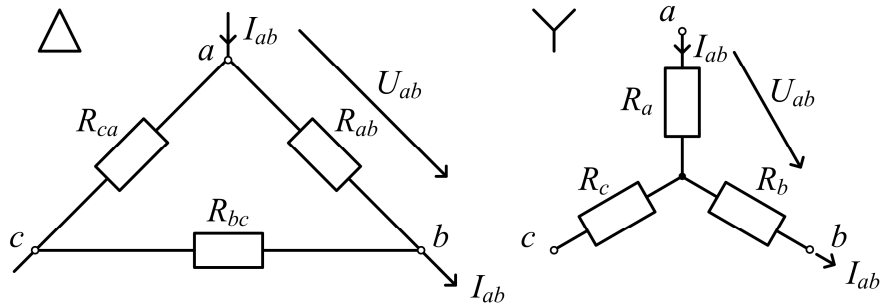


Рисунок 1.11

При з'єднанні «трикутником» і приєднанні до вузлів a, b :

$$U_{ab} = \frac{R_{ab}(R_{bc} + R_{ca})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} I_{ab}.$$

При з'єднанні «зіркою» і приєднанні до вузлів a, b :

$$U_{ab} = (R_a + R_b)I_{ab}.$$

Через те що U_{ab} і I_{ab} залишаються незмінними,

$$\frac{R_{ab}(R_{bc} + R_{ca})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = R_a + R_b.$$

Аналогічно отримуємо для вузлів b, c :

$$\frac{R_{bc}(R_{ab} + R_{ca})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = R_b + R_c,$$

і для вузлів c, a :

$$\frac{R_{ca}(R_{ab} + R_{bc})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = R_a + R_c.$$

Таким чином, маємо алгебраїчну систему трьох рівнянь, з яких залежно від напрямку еквівалентного перетворення, отримуємо:

- при перетворенні $\Delta \Rightarrow Y$ (R_{ab}, R_{bc}, R_{ca} відомі)

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}, \quad R_b = \frac{R_{bc}R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}, \quad R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}};$$

- при перетворенні $Y \Rightarrow \Delta$ (R_a, R_b, R_c відомі)

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}, \quad R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}, \quad R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}.$$

Таким чином, є можливість за допомогою еквівалентних перетворень, звести просте електричне коло до виду, поданого на рис. 1.12, і знайти струм крізь джерело ЕРС $I_0 = \frac{E}{R_e}$, а потім, використовуючи закони Ома і

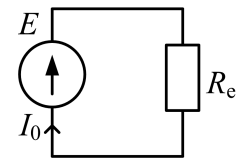


Рисунок 1.12

Кірхгофа, визначити струми у всіх інших вітках.

1.2.3. Розрахунок складних електричних кіл

Визначення струмів у всіх вітках можливе при прямому використанні законів Кірхгофа, оскільки кількість струмів дорівнює загальній кількості незалежних вузлів і контурів. Відповідно до системи алгебраїчних рівнянь, записаних за першим законом Кірхгофа (для $n-1$ незалежних вузлів) і за другим законом Кірхгофа (для $m-n+1$ незалежних контурів), буде повною для схеми з m вітками (відповідно струмами).

На рис. 1.13 зображена схема складного кола з трьома джерелами ЕРС. Нехай відомі всі ЕРС та опори, і необхідно знайти струми у вітках.

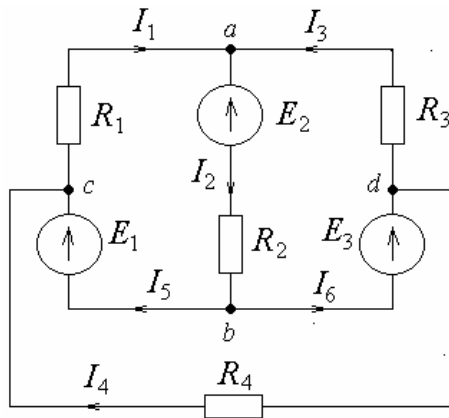


Рисунок 1.13

Перед складанням рівнянь необхідно обрати напрям протікання струмів, після цього треба обрати напрям обходів контурів.

Зручніше складати ці рівняння для більш простіших контурів з меншим числом елементів, причому при обранні контура необхідно, щоб у кожний контур увійшла хоча б одна нова вітка.

Для схеми на рис. 1.13 невідомими є шість струмів. Для вузлів a, b, c за першим законом Кірхгофа запишемо рівняння:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0;$$

$$I_2 - I_5 - I_6 = 0;$$

$$-I_1 + I_4 + I_5 = 0.$$

Решту три рівняння складаємо за другим законом Кірхгофа для контурів abc , adb , $cadR_4$:

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1 - E_2;$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_3 - E_2;$$

$$R_1 I_1 - R_3 I_3 + R_4 I_4 = 0.$$

Знайшовши розв'язання системи рівнянь з шістьма невідомими методом підстановки, визначимо струми. Якщо який-небудь зі струмів буде зі знаком «мінус», то його дійсний напрям протилежний до прийнятого.

1.2.3.1. Метод контурних струмів

Даний метод, запропонований Д. К. Максвелом, якщо відомі всі опори і ЕРС і треба знайти струми, дозволяє понизити порядок системи рівнянь та спростити розрахунок. Метод контурних струмів заснований на тому, що в незалежних контурах довільно визначаються контурні струми I_{kk} , алгебраїчна сума яких у спільних вітках подає відповідний струм. Вводяться поняття:

– контурна ЕРС E_{kk} (алгебраїчна сума ЕРС у контурі);

– контурний опір R_{kk} (арифметична сума опорів у контурі);

– міжконтурний опір $R_{pk} = R_{kp}$ (алгебраїчна сума опорів у вітці,

що належить до двох суміжних контурів p і k , береться зі знаком «+», якщо напрямок контурних струмів у вітці співпадає, і зі знаком «-», якщо вони зустрічні).

Повна система алгебраїчних рівнянь для n контурів буде такою:

$$\begin{cases} R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + R_{13}I_{33} + \dots + R_{1n}I_{nn} = E_{11}; \\ R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + R_{23}I_{33} + \dots + R_{2n}I_{nn} = E_{22}; \\ R_{31}I_{11} + R_{32}I_{22} + R_{33}I_{33} + \dots + R_{3n}I_{nn} = E_{33}; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ R_{n1}I_{11} + R_{n2}I_{22} + R_{n3}I_{33} + \dots + R_{nn}I_{nn} = E_{nn}. \end{cases}$$

Розв'язання будь-яким способом цієї системи рівнянь надає можливість визначити контурні струми $I_{11}, I_{22}, \dots, I_{nn}$.

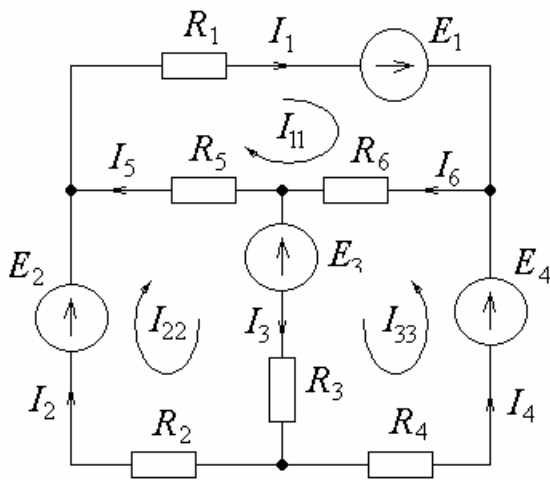


Рисунок 1.14

Розглянемо реалізацію методу на прикладі складної схеми (рис. 1.14), яка має шість невідомих струмів, а контурів три, що потребує тільки три рівняння. Напрямки контурних струмів I_{kk} ($k = 1, 2, 3$) та напрямки обходу контуру, які співпадають між собою, вибираються довільно.

Вважаємо, що по кожному з контурів тече свій контурний струм, що дорівнює діючому струму у зовнішній вітці:

$$I_1 = I_{11}; \quad I_2 = I_{22}; \quad I_4 = I_{33}.$$

Струми у суміжних вітках на основі принципу суперпозиції є алгебраїчною сумою контурних струмів:

$$I_3 = I_{22} + I_{33}; \quad I_5 = I_{11} - I_{22}; \quad I_6 = I_{11} + I_{33}.$$

Три контурні струми знаходяться з системи трьох рівнянь:

$$\begin{cases} R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + R_{13}I_{33} = E_{11}; \\ R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + R_{23}I_{33} = E_{22}; \\ R_{31}I_{11} + R_{32}I_{22} + R_{33}I_{33} = E_{33}, \end{cases}$$

де $R_{11} = R_1 + R_5 + R_6$; $R_{22} = R_2 + R_3 + R_5$; $R_{33} = R_3 + R_4 + R_6$ – це власні опори контурів, які дорівнюють сумі опорів відповідного опору;

$R_{12} = R_{21} = -R_5$; $R_{13} = R_{31} = R_6$; $R_{32} = R_{23} = R_3$ – це взаємні опори контурів. Взаємні опори беремо зі знаком «плюс», якщо контурні струми співпадають (збігаються) за напрямком, якщо не збігаються, то зі знаком «мінус»;

$E_{11} = E_1$; $E_{22} = E_2 - E_3$; $E_{33} = E_3 - E_4$ – контурні ЕРС, які дорівнюють алгебраїчній сумі ЕРС, діючих у відповідних контурах.

Вираз для контурного струму:

$$I_{kk} = E_{11} \frac{\Delta k_1}{\Delta} + E_{22} \frac{\Delta k_2}{\Delta} + E_{33} \frac{\Delta k_3}{\Delta},$$

де Δ – визначник системи:
$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix};$$

$\Delta k_n = (\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3)$ – алгебраїчне доповнення, або мінор, отриманий з визначника Δ через закреслення k -ї строчки та n -го стовпчика і помноження отриманого визначника на $(-1)^{k+n}$.

Знайшовши розв'язання системи рівнянь, визначаємо контурні струми, а відтак і діючі струми у кожній вітці, як алгебраїчну суму контурних струмів, що проходять в ній: $I_1 = I_{11}$; $I_2 = I_{22}$; $I_3 = I_{22} + I_{33}$; $I_4 = I_{33}$; $I_5 = I_{11} - I_{22}$; $I_6 = I_{11} + I_{33}$.

1.2.3.2. Принцип і метод суперпозиції

Принцип суперпозиції (накладання) заснований на незалежній дії окремих ЕРС в лінійних колах. Цей принцип є справедливим тільки для лінійних електричних кіл. Принцип суперпозиції полягає в тому, що струм у будь-якій вітці являє собою суму струмів, створюваних кожною ЕРС схеми окремо.

Метод дозволяє замінити аналіз складного кола з декількома джерелами аналізом декількох простих схем. Розрахунок за методом суперпозиції здійснюють так: усі ЕРС, крім однієї, по чергово прирівнюють до нуля і таким чином знаходять часткові струми, створювані кожною ЕРС окремо. Число простих схем дорівнює кількості джерел ЕРС.

Діючі значення струмів складного кола знаходять як алгебраїчну суму часткових струмів, створених окремо кожною ЕРС. Так, для складної схеми, зображеної на рис. 1.15, а, діючі значення струмів дорівнюють:

$$I_1 = I_1' - I_1'' ; I_2 = I_2'' - I_2' ; I_3 = I_3' + I_3'',$$

де I_1', I_2', I_3' – часткові струми, які створюються ЕРС E_1 та визначаються з простої схеми, зображеної на рис. 1.15, б;

I_1'', I_2'', I_3'' – часткові струми, які створюються ЕРС E_2 та визначаються з простої схеми, зображеної на рис. 1.15, в.

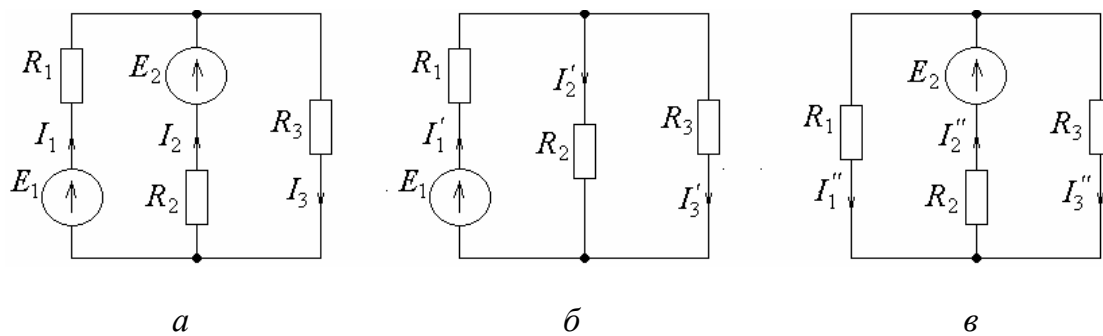


Рисунок 1.15

Аналогічно визначаються й напруги на ділянках кола, до яких також застосовується принцип накладання. Однак цей принцип неприйнятний для визначення потужностей у вітках складної схеми, оскільки вони знаходяться в квадратичній залежності від струмів.

1.2.3.3. Метод еквівалентного генератора

Для визначення струму в одній вітці складного кола з лінійними елементами найпростіше використовувати метод еквівалентного генератора, який ще називають методом активного двополюсника.

У цьому методі усе коло замінюється відносно до вітки з опором R , в якій необхідно визначити струм I двополюсником, тобто коло має два полюси (рис. 1.16, а). Цей двополюсник є активним тому, що містить в собі один або декілька джерел ЕРС і умовно позначається буквою А. Пасивний двополюсник не має джерел і позначається буквою П (рис. 1.16, з).

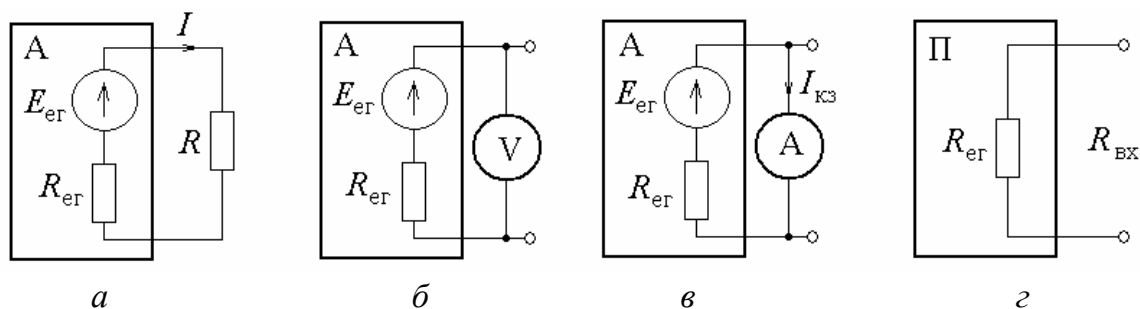


Рисунок 1.16

Активний двополюсник може бути представлений еквівалентним генератором, тобто джерелом електроенергії з однією ЕРС E_{er} та внутрішнім (еквівалентним) опором R_{er} .

Зі схеми на рис. 1.16, *a* струм I у вітці з опором R знаходиться за законом Ома для повного кола:

$$I = \frac{E_{\text{ер}}}{R_{\text{ер}} + R}.$$

Невідомі параметри еквівалентного генератора ЕРС $E_{\text{ер}}$ та опір $R_{\text{ер}}$ легко знаходяться з двох крайніх режимів його роботи: ЕРС $E_{\text{ер}}$ – з дослідження холостого ходу (ХХ), а опір $R_{\text{ер}}$ – з дослідження короткого замикання (КЗ).

У дослідженні холостого ходу вимикають елемент з опором R та до вільних полюсів двополюсника підключають вольтметр, який вимірює напругу холостого ходу (рис. 1.16, *б*). Ця напруга дорівнює ЕРС еквівалентного генератора:

$$U_{\text{хх}} = E_{\text{ер}}.$$

Напругу ХХ еквівалентного генератора можна не вимірювати, а розрахувати при відключенні вітки між його полюсами.

У дослідженні короткого замикання до полюсів двополюсника при відключеному елементі з опором R підключають амперметр та вимірюють струм КЗ (рис. 1.16, *в*). З цієї схеми випливає співвідношення для струму:

$$I_{\text{кз}} = \frac{E_{\text{ер}}}{R_{\text{ер}}},$$

звідки

$$R_{\text{ер}} = \frac{E_{\text{ер}}}{I_{\text{кз}}} = \frac{U_{\text{хх}}}{I_{\text{кз}}}.$$

Опір $R_{\text{ер}}$ можна також визначити як вхідний опір $R_{\text{вх}}$ пасивного двополюсника (при замкнутих накоротко ЕРС). Тоді,

$$R_{\text{ер}} = R_{\text{вх}}.$$

У випадку зміни опору R струм I у вітці визначається за формулою $I = \frac{E_{\text{ер}}}{R_{\text{ер}} + R}$, через те що параметри $E_{\text{ер}}$ та $R_{\text{ер}}$ еквівалентного генератора незмінні. Це дозволяє широко застосовувати метод еквівалентного генератора і при аналізі складних кіл з елементами, опори яких змінюються.

1.2.4. Потужність у колі постійного струму

Робота джерела електричної енергії, що витрачається на пересування Q електричних зарядів за час t , $A_{\text{дж}} = \pm EQ$: «+», якщо напрям пересування зарядів співпадає з напрямом E , і «-» – якщо воно зустрічне.

Відповідно до потужності джерела електричної енергії $P_{\text{дж}} = \frac{A_{\text{дж}}}{t} = \pm E \frac{Q}{t} = \pm EI$. Енергія, яку за час t забирає споживач,

$A_{\text{сп}} = UQ$. Потужність споживача $P_{\text{сп}} = \frac{A_{\text{сп}}}{t} = U \frac{Q}{t} = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$ зав-

жди зі знаком «+» незалежно від напрямку струму і полярності напруги. Вимірюється потужність у *ватах* [Вт].

Це збігається з *законом Джоуля-Ленца*: кількість електричної енергії W , перетвореної в теплову на ділянці з опором R за час t дорівнює $W = RI^2t$.

Теплова дія електричного струму корисно використовується в техніці і являється основою роботи електропечей, побутових та промислових нагрівальних приладів, електрозварки та ін. Однак в проводах ліній електропередач (ЛЕП), в обмотках електричних машин, трансформаторів та апаратів вона є джерелом небажаних втрат енергії, причиною їх перегріву та пошкодження ізоляції.

Баланс потужності в колі постійного струму визначається таким чином: алгебраїчна сума потужностей джерел електричної енергії дорівнює сумі потужностей споживачів:

$$\sum_{k=1}^n \pm E_k I_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k^2.$$

1.2.5. Джерело ЕРС у колі постійного струму

Розрізняють *ідеальне* і *реальне* джерело ЕРС (рис. 1.17). Ідеальне не має внутрішнього опору і напруга на виході з нього незмінна при будь-якому струмі.

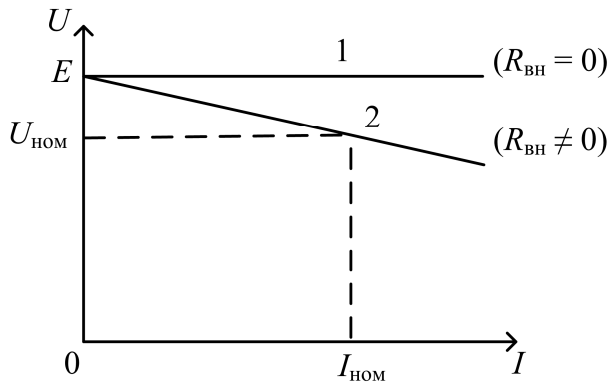


Рисунок 1.17

В реальному джерелі ЕРС внутрішній опір доволі малий і напруга на його затисках при змінюванні струму від 0 до $I_{\text{ном}}$ змінюється незначно. Це генератори, акумулятори та ін. До джерел ЕРС можна віднести електромеханічні генератори, гальванічні елементи та акумулятори.

Скориставшись формулою $I = \frac{E}{R_{\text{аі}} + R}$ отримуємо:

$$E = I R_{\text{вн}} + I R = I R_{\text{вн}} + U ,$$

де U – напруга на споживачі або на затисках джерела.

Режими роботи реального джерела ЕРС

Неробочий режим (холостий хід) (рис. 1.18, а): $U = E$; $I = 0$; $P_{\text{дж}} = EI = 0$; $P_{\text{н}} = UI = 0$.

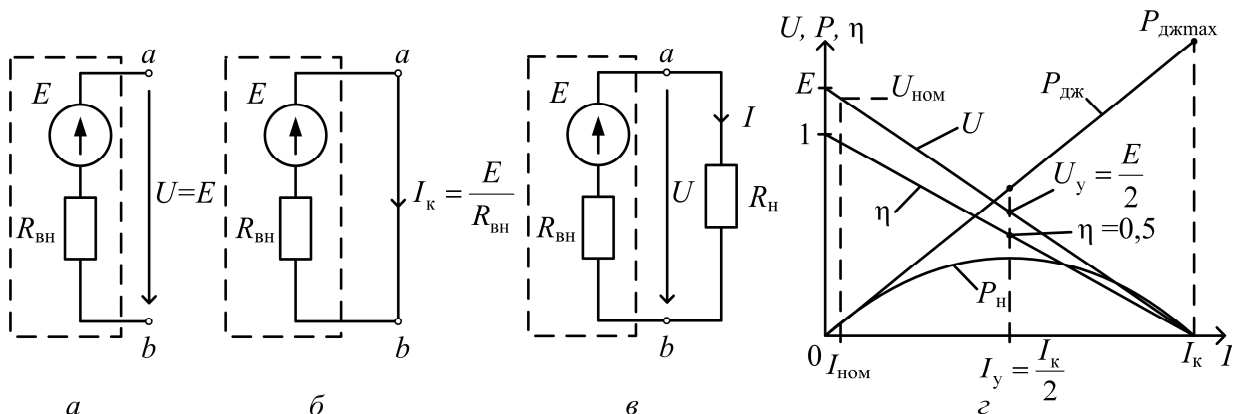


Рисунок 1.18

Коротке замикання (рис. 1.18, б): $U = 0$; $I_{\text{к}} = \frac{E}{R_{\text{вн}}}$;

$$P_{\text{дж}} = EI_{\text{к}} = \frac{E^2}{R_{\text{вн}}} = P_{\text{джmax}}; P_{\text{н}} = UI_{\text{к}} = 0 \cdot I_{\text{к}} = 0.$$

Це аварійний режим (вся енергія виділяється в джерелі електричної енергії, що може спричинити його руйнування). Тому такий режим можна реалізувати тільки короткочасно.

Узгоджений режим. На рис. 1.18, в показано навантаження реального джерела ЕРС: $U = E - R_{\text{вн}} I$; $P_{\text{н}} = UI = EI - R_{\text{вн}} I^2$. Максимальному значенню потужності навантаження відповідає умова: $\frac{dP_{\text{н}}}{dI} = 0$, звідки

$$I_{\text{у}} = \frac{E}{2R_{\text{вн}}} = \frac{I_{\text{к}}}{2}.$$

Такий режим називається *узгодженим*. Він виникає при $R_{\text{н}} = R_{\text{вн}}$ і дозволяє передавати споживачу максимальну потужність. Але коефіцієнт корисної дії $\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{дж}}} = \frac{EI - R_{\text{вн}} I^2}{EI} = 1 - \frac{R_{\text{вн}} I}{E} = 1 - \frac{1}{I_{\text{к}}}$ при $I = I_{\text{у}}$ дорівнює 0,5, тобто віддається тільки половина потужності, що неприпустимо за довготривалої роботи, особливо, якщо це джерело великої потужності. Тому узгоджений режим допускається або короткочасно (наприклад, при пуску двигуна стартером), або для джерела дуже малої потужності (наприклад, в електроніці).

Номинальний режим вибирається в зоні максимального ККД. Слід зауважити, що $\eta = 1$ бути не може. Це результат деякого спрощення.

Графічні залежності напруги U , потужностей $P_{\text{дж}}$ і $P_{\text{н}}$, ККД η від струму I показані на рис. 1.18, з.

Запитання для самоконтролю

1. Що називається електричним колом і з яких елементів воно може складатися?
2. Які електричні величини використовуються для опису стану електричних кіл та процесів у них?
3. Що таке схема електричного кола і які види схем ви знаєте?
4. Поясніть фізичний зміст ідеальних елементів схем заміщення електричних кіл і напишіть співвідношення електричних величин для цих елементів.
5. Що називають віткою, вузлом, контуром електричного кола?
6. Яке з'єднання елементів електричного кола називається послідовним, паралельним, змішаним?
7. Сформулюйте закони Кірхгофа для електричних кіл та наведіть приклади їхнього застосування.
8. Як визначається потужність і баланс потужностей для елементів електричних кіл постійного струму?
9. Які режими роботи властиві джерелу електроенергії?
10. Зобразіть і поясніть характеристики, що ілюструють зміну параметрів джерела електроенергії при зміні його навантаження.
11. Як визначається еквівалентний опір кола при послідовному, паралельному і змішаному з'єднанні споживачів?
12. У чому полягає суть методу еквівалентних перетворень і який порядок розрахунку електричних кіл за цим методом?
13. Яка кількість рівнянь за першим і другим законами Кірхгофа, які необхідно скласти для розрахунку складного кола постійного струму?
14. Яким чином можна перетворити з'єднання елементів за схемою «зірка» в з'єднання за схемою «трикутник» та навпаки?
15. У чому суть методу контурних струмів для розрахунку електричних кіл постійного струму?
16. У якому випадку доцільно застосовувати метод еквівалентного генератора і в чому суть цього методу?
17. Як визначаються параметри елементів еквівалентного генератора: його внутрішній опір та ЕРС?

Розділ 2

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ

Під *змінним струмом* розуміють струм, значення і напрямки якого періодично змінюються.

Найбільш поширеною формою змінного струму є синусоїдна, оскільки:

- найпростіше отримати таку форму струму;
- відносна простота розрахунку кіл синусоїдного струму;
- ККД електричних машин і пристроїв вище при синусоїдному струмі.

Потужними джерелами синусоїдної ЕРС є електромеханічні генератори, які перетворюють механічну енергію обертання первинного привода в електричну енергію змінного струму. Процес отримання такої ЕРС можна показати на моделі генератора змінного струму (рис. 2.1, *а*) та графіку синусоїдної ЕРС (рис. 2.1, *б*). Положення рамки (вітка) генератора в межах одного оберту навколо її осі в будь-який момент часу визначається кутом α відносно нейтральної лінії n - m .

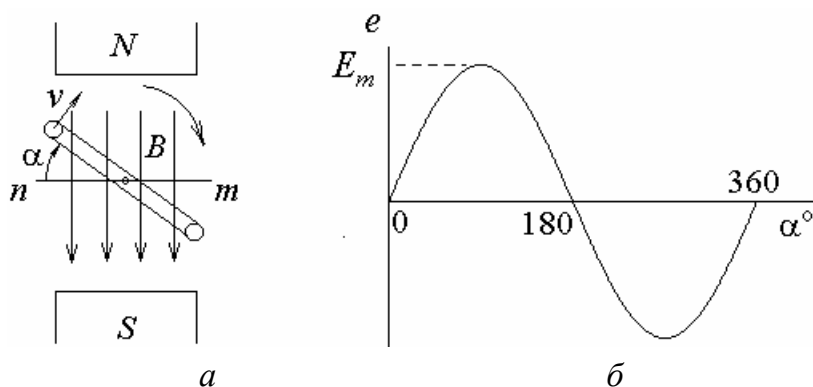


Рисунок 2.1

При рівномірному обертанні рамки в рівномірному і однорідному магнітному полі з індукцією B , яка утворена між полюсами генератора N і

S її активні ділянки довжиною l пересікають силові лінії магнітного поля та в кожній із них за законом електромагнітної індукції буде виникати ЕРС $e = Blv_n$. Нормальна складова швидкості, яка перпендикулярна до силових магнітних ліній, дорівнює $v_n = v \cdot \sin \alpha$. Отже ЕРС в рамці має синусоїдну форму:

$$e = Blv \sin \alpha = E_m \sin \alpha,$$

де $E_m = Blv$ – амплітуда ЕРС.

Сучасна електрифікація здійснюється на змінному струмі, хоча історично її попередником був постійний струм. Промислові електростанції у всьому світі виробляють електроенергію синусоїдного змінного струму.

Найбільшого поширення змінний струм набув тому, що:

1. Змінний струм створити простіше, ніж постійний за допомогою електричних генераторів, ротор яких обертається стороннім приводом, а напруга, і, відповідно, потужність не обмежена щітковим контактом, як в генераторах постійного струму;

2. Змінний струм можна легко перетворити у струм іншої напруги за допомогою трансформаторів;

3. Змінний струм можна передавати на велику відстань з малими втратами. Для цього змінну напругу U_1 на електростанціях за допомогою трансформаторів підвищують до величини U_2 , тим самим знижуючи величину струму з величини I_1 до I_2 . Передачу електроенергії здійснюють за допомогою високовольтних ліній електропередач при відносно невеликому струмі. При цьому втрати, що пропорційні квадрату струму $P = I^2 R$, істотно зменшуються.

2.1. Параметри синусоїдного змінного струму

Можна виділити 4 форми подання синусоїдного змінного струму:

- математична – у вигляді формул;
- графічна – у вигляді графіків у часі;
- векторна – у вигляді векторів;
- символічна – у вигляді комплексних чисел.

Синусоїдні напруга і струм в математичній формі мають наступний вигляд:

$$u = U_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_u\right); \quad i = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi_i\right), \quad (2.1)$$

де u, i – миттєві значення напруги і струму – значення у будь-який момент часу; U_m, I_m – амплітудні значення – найбільші значення напруги і струму; T – період – проміжок часу, за який відбувається повний цикл змінення величини, що розглядається. Період вимірюється в *секундах* [с];

$f = \frac{1}{T}$ – частота струму – число періодів за одиницю часу (за секунду).

Частота вимірюється в *герцах* [Гц]. В Україні і більшості країн світу як стандартна промислова частота прийнята 50 Гц, а в США та Канаді – 60 Гц;

$\frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega$ – кутова частота – (один оберт за період). Вимірюється в [рад/с];

$(\omega t + \psi_u)$ – аргумент синуса – це фаза, характеризує значення функції у даний момент часу; ψ_u, ψ_i – початкові фази напруги і струму (при $t = 0$); Початкова фаза – це постійний кут, на який синусоїда на початку зєзунута відносно початку координат (при $t = 0$) вліво $\psi > 0$ або вправо $\psi < 0$.

На рис. 2.2 показане графічне зображення синусоїдних напруги та струму.

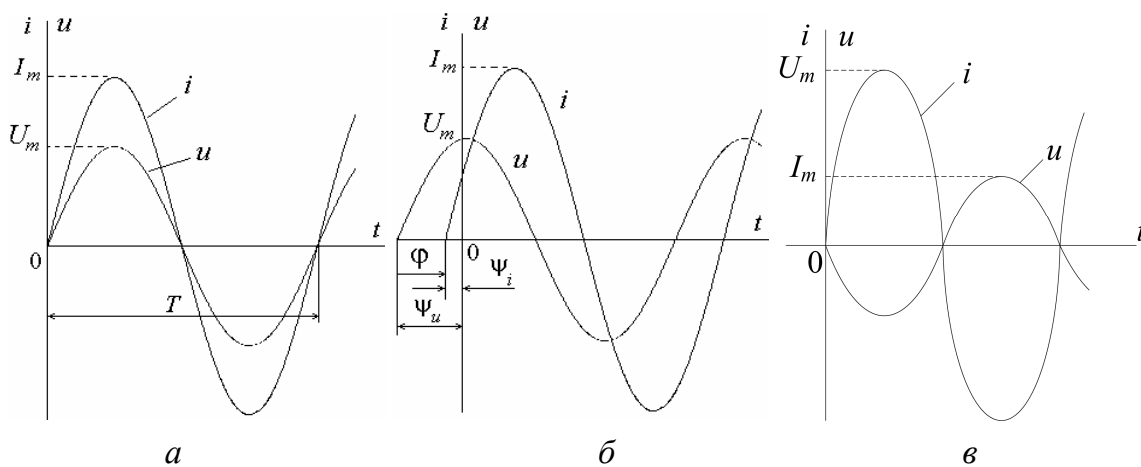


Рисунок 2.2

Зсувом фаз φ називається різниця початкових фаз напруги та струму:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i. \quad (2.2)$$

Якщо початкові фази напруги та струму рівні $\psi_u = \psi_i$, то зсув фаз $\varphi = 0$, і струм та напруга співпадають за фазою (рис. 2.2, а).

Якщо $\psi_u > \psi_i$, то $\varphi > 0$, і напруга випереджає за фазою струм на значення кута φ (рис. 2.2, б).

Якщо $\varphi = 180^\circ$, напруга і струм знаходяться в протифазі (рис. 2.2, в).

2.2. Середнє і діюче значення змінного струму

Середнє значення будь-якої синусоїдної функції за період дорівнює нулю. Відтак середнє значення синусоїдного струму визначають як середнє його значення за половину періоду (рис. 2.3).

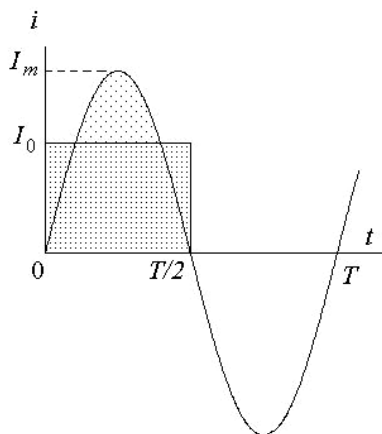


Рисунок 2.3

Відповідно, середнє значення синусоїдного змінного струму I_0 дорівнює:

$$I_0 = \frac{\int_0^{T/2} i dt}{T/2} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt, \quad (2.3)$$

через те що струм синусоїдний $i = I_m \sin \omega t$,

$I_0 = -\frac{2}{T} \frac{I_m}{\omega} \cos \omega t \Big|_0^{T/2}$. А оскільки $\omega T = 2\pi$, то

$$I_0 = -\frac{2}{2\pi} I_m \left[\cos \frac{2\pi T}{T} \frac{T}{2} - \cos 0 \right] = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,637 I_m \quad (2.4)$$

Аналогічні вирази можна записати для середніх значень напруги та ЕРС:

$$U_0 = \frac{2}{\pi} U_m \approx 0,637 U_m; \quad E_0 = \frac{2}{\pi} E_m \approx 0,637 E_m.$$

Середні значення електричних величин змінного струму використовуються, наприклад, при аналізі роботи перетворювачів та випрямля-

чів, вимірювальних приладів випрямної системи.

Але найбільш поширеною характеристикою змінного струму є його діюче значення. При вимірюваннях змінний синусоїдний струм зіставляють з постійним струмом за тепловою дією.

Діюче значення змінного струму дорівнює такому значенню постійного струму I , який в опорі R за час $t = T$ виділяє таку ж кількість тепла W , як і даний змінний струм.

При протіканні постійного струму I виділиться тепло (енергія):

$$W_{\text{пост}} = I^2 RT .$$

Якщо через той же опір R пропустимо змінний струм i , то виділиться енергія:

$$W_{\text{змін}} = \int_0^T i^2 R dt .$$

Прирівняємо енергію, що виділилася на постійному і на змінному струмах $W_{\text{пост}} = W_{\text{змін}}$ за час $t = T$, який дорівнює періоду синусоїдного струму $i = I_m \sin \omega t$:

$$I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt ,$$

звідки отримуємо загальний вираз для діючого значення змінного струму:

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

Так як $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$, то $I = \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} \int_0^T dt - \frac{I_m^2}{2T} \int_0^T \cos 2\omega t dt} .$

Оскільки $\int_0^T dt = T$, а $\int_0^T \cos 2\omega t dt = 0$, то діюче значення синусоїдного

струму має вигляд:

$$I = \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} T} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_m . \quad (2.5)$$

Аналогічно можна записати для діючих значень напруги та ЕРС:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707U_m; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707E_m.$$

Зазначимо, що для діючого значення напруги $U = 220$ В, максимальне значення дорівнює $U_m \approx 311$ В. Вимірювальними приладами змінного струму (крім осцилографів) зазвичай вимірюють саме діючі значення синусоїдних ЕРС, напруги та струму.

2.3. Отримання синусоїдного змінного струму

Основним джерелом синусоїдного змінного струму являються ге-

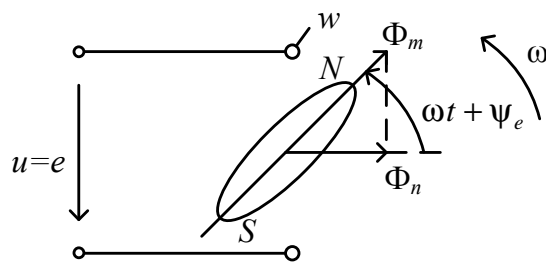


Рисунок 2.4

нератори змінного струму. Схематично це виглядає таким чином (рис. 2.4): у площині, що перпендикулярна до площини котушки з числом витків w , проти годинникової стрілки обертається з кутовою частотою ω магнітний потік Φ_m (від електромагніта або

постійного магніту). Його нормальна складова до площини котушки зчіплюється з нею і утворює потокозчеплення $\psi = w\Phi_n = w\Phi_m \cos(\omega t + \psi_e)$. Відповідно до закону електромагнітної індукції наводиться ЕРС:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = \omega w\Phi_m \sin(\omega t + \psi_e).$$

За визначенням $e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$, тому

$$E_m = \omega w\Phi_m = 2\pi f w\Phi_m,$$

а діюче значення ЕРС буде таким:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w\Phi_m. \quad (2.6)$$

Ця формула універсальна для будь-якої котушки з числом витків w незалежно від того, яким чином буде змінюватися з частотою f пов'язаний з нею магнітний потік Φ_m .

2.4. Подання синусоїдного змінного струму векторами і комплексними числами

Для проведення розрахунків і аналізу електричних кіл змінного струму дуже зручно подавати його параметри векторами й комплексними числами. Дійсно, синусоїдна функція напружання пов'язана з обертанням вектора, довжина якого дорівнює модульному значенню цієї функції. Якщо в якості вектора, що обертається з кутовою частотою ω , взяти амплітудне (або діюче) значення напруги, струму, то їх проекція на вертикальну вісь буде дорівнювати відповідному миттєвому значенню (або поділеному на $\sqrt{2}$ для діючих значень рис. 2.5, а).

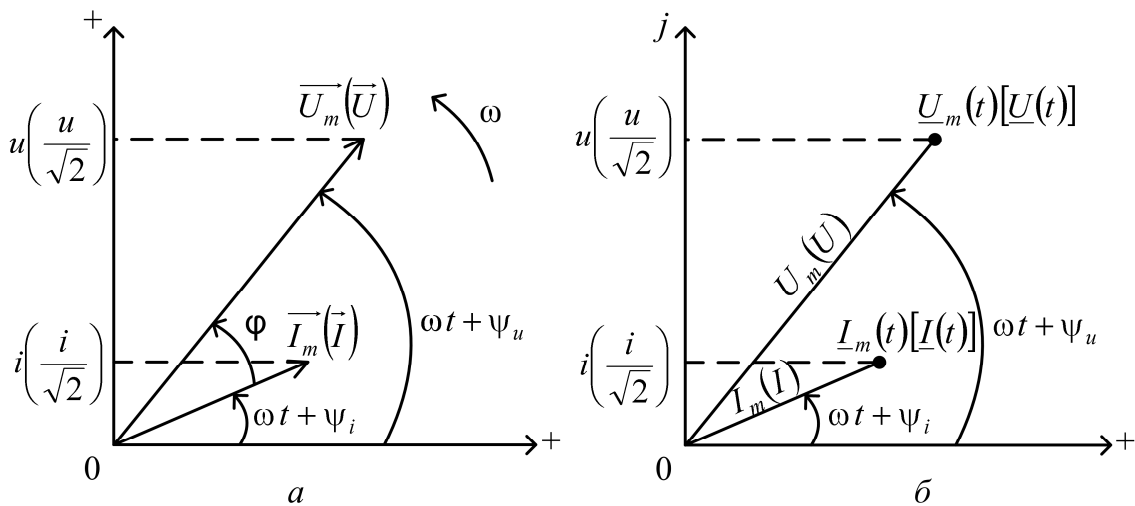


Рисунок 2.5

Треба відзначити, що внаслідок обертання векторів з однаковою кутовою частотою вони якби «прив'язані» один до одного і кут ϕ між ними зберігається незмінним. Тому при побудові векторних діаграм достатньо орієнтуватись на початкові фази, прийнявши одну з них за нульову.

Близько до векторів стоять комплексні числа (рис. 2.5, б), модульне значення яких можна приймати рівними амплітудному (або діючому) значенню відповідного параметра. Аргументи цих комплексних чисел будуть дорівнювати відповідній фазі. Таким чином у будь-яку мить часу комплексна напруга (у показовій формі запису) буде такою:

при орієнтації на амплітуду

$$\underline{U}_m(t) = U_m e^{j(\omega t + \psi_u)} = \underline{U}_m e^{j\omega t}, \quad (2.7)$$

де $\underline{U}_m = U_m e^{j\psi_u}$ – комплексна амплітуда напруги;

при орієнтації на діюче значення

$$\underline{U}(t) = U e^{j(\omega t + \psi_u)} = \underline{U} e^{j\omega t}, \quad (2.8)$$

де $\underline{U} = U e^{j\psi_u}$ – комплексне діюче значення напруги.

Можливі ще такі форми запису комплексних чисел (на прикладі напруги): алгебраїчна і тригонометрична.

$$\text{Алгебраїчна форма } \underline{U}_m(t) = U'_m + jU''_m,$$

де U'_m і U''_m – дійсна і уявна складові комплексної напруги (рис. 2.5, б).

В тригонометричній формі запису:

$$\underline{U}_m(t) = U_m \cos(\omega t + \psi_u) + jU_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (2.9)$$

звідки видно, що уявна складова і є миттєвим значенням.

Для діючого значення:

$$\underline{U}(t) = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + \psi_u) + j \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \psi_u), \quad (2.10)$$

де уявна складова дорівнює миттєвому значенню напруги поділеному на $\sqrt{2}$.

Аналогічно формуються комплексні значення струму:

$$\underline{I}_m(t) = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = \underline{I}_m e^{j\omega t} = I_m \cos(\omega t + \psi_i) + jI_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

де $\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$;

$$\underline{I}(t) = I e^{j(\omega t + \psi_i)} = \underline{I} e^{j\omega t} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + \psi_i) + j \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \psi_i), \text{ де } \underline{I} = I e^{j\psi_i}.$$

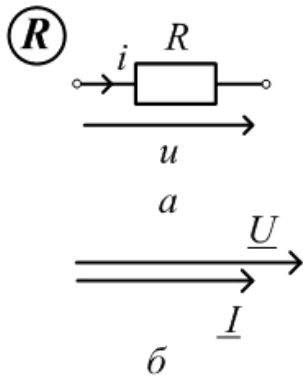
Корисно знати характерні комплексні значення одиничного орту:

$$1 = e^{j0}; \quad j = e^{j\frac{\pi}{2}}; \quad -1 = e^{j\pi}; \quad -j = e^{-j\frac{\pi}{2}}. \quad (2.11)$$

Використання комплексних чисел дозволяє проводити розрахунок електричних кіл змінного струму символічним методом, який передбачає заміну миттєвих значень напруги, струму, ЕРС комплексними числами.

2.5. R, L, C у колі змінного струму

Розглянемо, як співвідносяться струми і напруги параметричних



складових функціональних елементів синусоїдного змінного струму в комплексному і векторному вигляді, скориставшись символічним методом.

Резистивна складова R (рис. 2.6, а) пов'язує миттєві значення напруги і струму за законом Ома $u = Ri$. Символічний метод подає:

$$\underline{U}(t) = R \underline{I}(t) \Rightarrow \underline{U} e^{j\omega t} = R \underline{I} e^{j\omega t}.$$

Скорочуючи $e^{j\omega t}$, отримуємо:

$$\underline{U} = R \underline{I}; \quad U e^{j\psi_u} = R \underline{I} e^{j\psi_i} \quad (2.12)$$

Рівність двох комплексних чисел означає рівність їх модулів і аргументів. Тобто $U = RI$; $\psi_u = \psi_i$; $\phi = \psi_u - \psi_i = 0$.

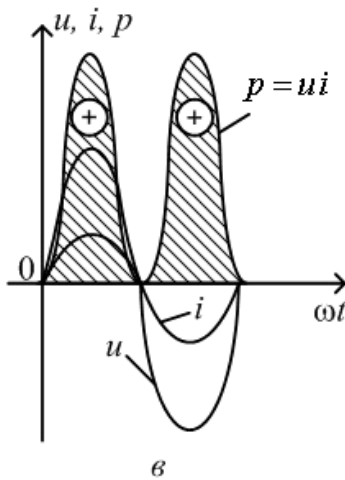


Рисунок 2.6

Перша рівність означає, що і у колі змінного струму виконується закон Ома для резистивного елемента. Друга рівність означає, що при проходженні струму крізь резистивний елемент його фаза по відношенню до напруги не змінюється (кут $\phi = 0$), напрями векторів струму й напруги співпадають (рис. 2.6, б). Миттєва потужність $p = ui$, що виділяється в резистивному елементі, завжди зі знаком «+», тобто споживається їм (рис. 2.6, в).

Індуктивна складова L (рис. 2.7, а) відповідно до закону електромагнітної індукції надає такий зв'язок миттєвих значень напруги і струму

$u = -e_L = L \frac{di}{dt}$. Відповідно, перехід до комплексних чисел має такий

вигляд:

$$\underline{U}(t) = L \frac{d\underline{I}(t)}{dt}; \quad \underline{U} e^{j\omega t} = L \frac{d(\underline{I} e^{j\omega t})}{dt} = j\omega L \underline{I} e^{j\omega t}.$$

Скорочуючи $e^{j\omega t}$, отримуємо $\underline{U} = j\omega LI$.

Вводиться поняття «індуктивний опір»:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L. \quad (2.13)$$

Таким чином, на індуктивному елементі:

$$\underline{U} = jX_L \underline{I}, \quad (2.14)$$

що можна також подавати у вигляді $\underline{U} = X_L \underline{I} e^{j\frac{\pi}{2}}$. Відповідно $U e^{j\psi_u} = X_L I e^{j(\psi_i + \frac{\pi}{2})}$, звідки $U = X_L I$;

$$\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}; \quad \varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2}, \quad (2.15)$$

а це означає, що при проходженні струму крізь індуктивність він відстає від напруги на 90° ($\varphi = \frac{\pi}{2}$). Це відображено на векторній діаграмі (рис. 2.7, б).

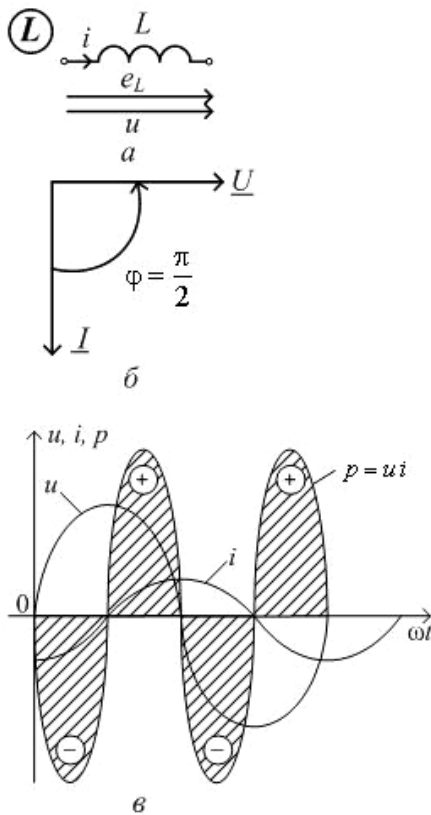


Рисунок 2.7

Миттєва потужність $p = ui$ двічі за півперіод змінює свій знак, що пов'язано з перемагнічуванням (рис. 2.7, в). Тому вона не може виходити з індуктивного елемента, за винятком одноразового розряду при розриві електричного кола.

Згідно до накопичення зарядів на ємності C (рис. 2.8, а) зв'язок між напругою і струмом має такий вигляд:

$$dq = C du = i dt; \quad u = \frac{1}{C} \int i dt.$$

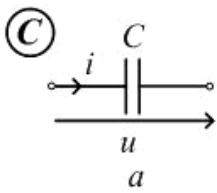
Відповідно до символічного методу

$$\underline{U}(t) = \frac{1}{C} \int \underline{I}(t) dt = \frac{1}{C} \int \underline{I} e^{j\omega t} dt = \frac{1}{j\omega C} \underline{I} e^{j\omega t}.$$

Таким чином,

$$\underline{U} e^{j\omega t} = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I} e^{j\omega t} \Rightarrow \underline{U} = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I}.$$

Вводиться поняття «ємнісний опір»:



$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (2.16)$$

$$\text{Тоді } \underline{U} = -j X_C \underline{I} = X_C \underline{I} e^{-j\frac{\pi}{2}}; \quad (2.17)$$

$$U e^{j\psi_u} = X_C I e^{j(\psi_i - \frac{\pi}{2})}, \text{ звідки } U = X_C I;$$

$$\psi_u = \psi_i - \frac{\pi}{2}; \quad \varphi = \psi_u - \psi_i = -\frac{\pi}{2}, \quad (2.18)$$

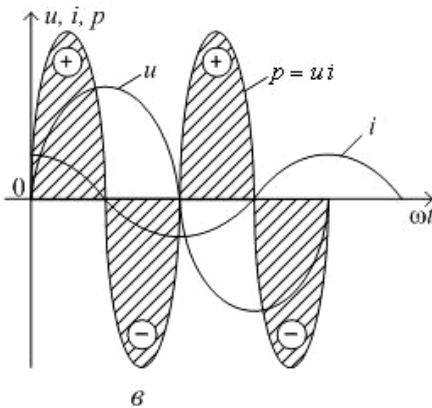
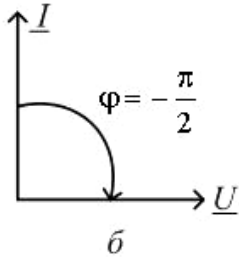


Рисунок 2.8

а це означає, що при проходженні струму крізь ємність він опереждає напругу на 90° ($\varphi = -\frac{\pi}{2}$). Це відображено на векторній діаграмі (рис. 2.8, б).

Миттєва потужність $p = ui$ двічі змінює свій знак, що пов'язано з перезарядкою (рис. 2.8, в). Тому вона не може виходити з ємнісного елемента, за винятком одноразового розряду при короткому замиканні електричного кола.

Варто звернути увагу на те, що миттєві потужності індуктивного і ємнісного елементів завжди в протифазі. Тому з'єднання конденсатора (близького до ідеальної ємності) і котушки (близької до ідеальної індуктивності) надає можливість створювати коливальні контури. Енергія магнітного поля перетворюється на енергію електричного поля і навпаки через півперіоду.

2.6. Закони Ома й Кірхгофа в колі змінного струму

Як впливає з розгляду R, L, C , закон Ома можна використовувати для встановлення арифметичного зв'язку між діючими значеннями напруги і струму. Але при необхідності урахування фазності треба переходити до миттєвих значень напруги й струму або подавати їх у векторному чи комплексному вигляді.

Закони Кірхгофа в колах змінного струму справедливі для миттєвих значень (тобто в кожен момент часу) електричних величин, або для векторів та комплексних значень діючих величин.

1-й закон Кірхгофа: Алгебраїчна сума миттєвих значень струмів у вузлі дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0. \quad (2.19)$$

Алгебраїчна сума комплексних значень струмів у вузлі (або геометрична сума векторів, що зображають струми у вузлі) дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0. \quad (2.20)$$

2-й закон Кірхгофа: Якщо кожна ділянка контуру електричного кола має R , L , C елементи, тоді миттєві значення ЕРС, діючі у замкненому контурі, дорівнюють алгебраїчній сумі миттєвих значень падінь напруги на ділянках цього контуру:

$$\sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^m \left(i_k R_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{1}{C_k} \int i_k dt \right). \quad (2.21)$$

Сума комплексних значень ЕРС (або їх векторів), діючих у замкненому контурі, дорівнює сумі комплексних значень падінь напруги на ділянках цього контуру:

$$\sum_{k=1}^n \underline{E}_k = \sum_{k=1}^m R_k \underline{I}_k + \sum_{k=1}^m jX_{L_k} \underline{I}_k - \sum_{k=1}^m jX_{C_k} \underline{I}_k. \quad (2.22)$$

2.7. Послідовне з'єднання R , L , C

Коло синусоїдного змінного струму, що складається з послідовно з'єднаних R , L , C показано на рис. 2.9, а. Треба знайти його еквівалентну заміну (рис. 2.9, б).

Для цього скористаємося другим законом Кірхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = \\ &= R\underline{I} + jX_L \underline{I} - jX_C \underline{I} = \\ &= [R + j(X_L - X_C)]\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

де $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Z e^{j\varphi}$ – повний комплексний опір, що

складається з активного R й реактивного $X = X_L - X_C$ опорів.

По модулю повний опір дорівнює $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, а його фазний кут $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ (рис. 2.10). Все це повністю узгоджується й з векторною діаграмою (рис. 2.11).

Повна потужність у колі синусоїдного змінного струму має ту особливість, що одна частина її може бути використана для перетворення в інші види енергії (активна потужність), а друга частина – на створення електричних і магнітних полів (реактивна потужність).

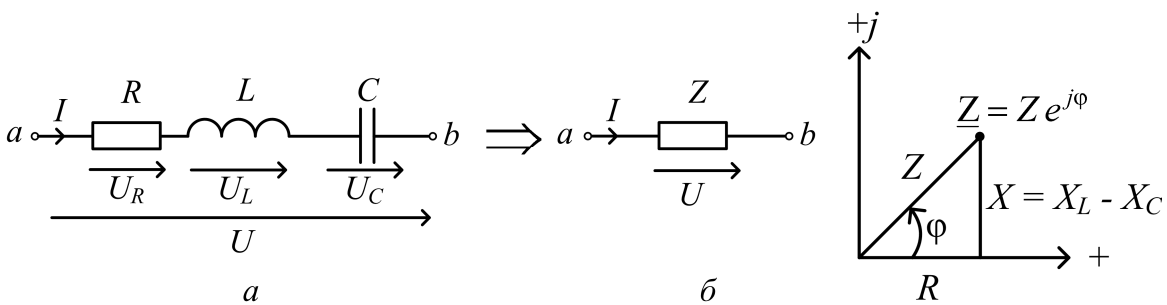


Рисунок 2.9

Рисунок 2.10

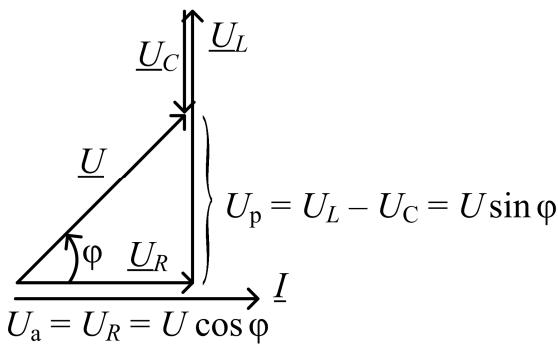


Рисунок 2.11

Повну потужність S , миттєве значення якої $p = ui$, можна визначити за допомогою символічного методу. Враховуючи те, що кут $\varphi = \psi_u - \psi_i$, комплексне значення струму треба брати спряженим. Тоді повна комплексна потужність буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{U} \underline{I}^* = U e^{j\psi_u} I e^{-j\psi_i} = U I e^{j(\psi_u - \psi_i)} = U I e^{j\varphi} = S e^{j\varphi} = \\ &= S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + jQ. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Таким чином, у колі змінного струму розрізняють три види потужності:

$$\text{Повна потужність } S = UI, \quad (2.25)$$

одиниця вимірювання *вольт-ампер* [ВА];

$$\text{Активна потужність } P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi, \quad (2.26)$$

одиниця вимірювання *ват* [Вт];

$$\text{Реактивна потужність } Q = S \sin \varphi = U I \sin \varphi, \quad (2.27)$$

одиниця вимірювання *вольт-ампер реактивний* [вар].

З векторної діаграми також отримуємо.

Для співпадаючих по фазі U_a і I : $P = U_a I = U I \cos \varphi$.

Для зсунутих по фазі на 90° U_p і I : $Q = U_p I = U I \sin \varphi$.

Відповідно $S = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} \cdot I = \sqrt{U^2 \cos^2 \varphi + U^2 \sin^2 \varphi} \cdot I = U I$.

2.8. Паралельне з'єднання R, L, C

Коло синусоїдного змінного струму, що складається з паралельно з'єднаних R, L, C , показано на рис. 2.12, а. Треба визначитися з його еквівалентною заміною (рис. 2.12, б).

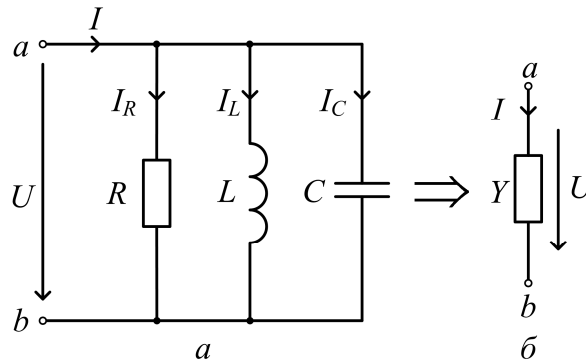


Рисунок 2.12

Відповідно до першого закону Кірхгофа:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C \Rightarrow \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{\underline{U}}{R} + \frac{\underline{U}}{jX_L} + \frac{\underline{U}}{-jX_C}.$$

Скорочуючи \underline{U} , отримуємо:

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R} - j \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right). \quad (2.28)$$

Звертаємося до поняття провідності: $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$ – повна комплексна провідність; $G = \frac{1}{R}$ – активна провідність; $B_L = \frac{1}{X_L}$ – індуктивна провід-

ність $B_C = \frac{1}{X_C}$ – емнісна провідність; $B = B_L - B_C$ – реактивна провідність.

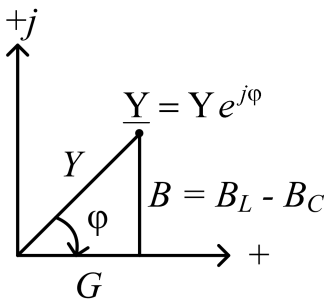


Рисунок 2.13

Остаточно повна комплексна провідність має вигляд $\underline{Y} = G - jB$ (рис. 2.13), модульне значення якої $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$, а кут φ визначається з урахуванням того, що початкова фаза струму ψ_i має протилежний знак до нього:

$$\varphi = -\arctg \frac{-B}{G} = \arctg \frac{B}{G}. \quad (2.29)$$

Загальний струм:

$$\underline{I} = \underline{Y} \underline{U}. \quad (2.30)$$

Векторну діаграму можна побудувати з розрахунку струмів для кожного окремого елемента за законом Ома (рис. 2.14). Як і векторна діаграма при послідовному з'єднанні R, L, C , вона подає такі значення видів потужності:

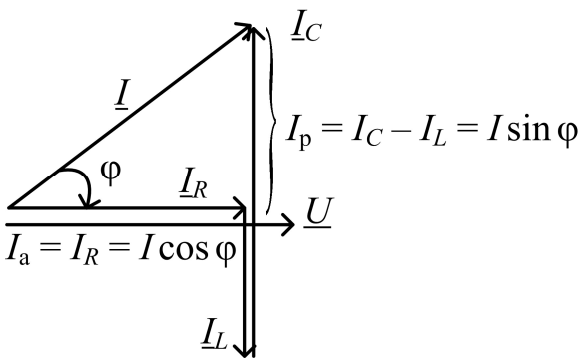


Рисунок 2.14

активна потужність

$$P = U I_a = U I \cos \varphi;$$

реактивна потужність

$$Q = U I_p = U I \sin \varphi;$$

повна потужність

$$S = U \cdot \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = U \sqrt{I^2 \cos^2 \varphi + I^2 \sin^2 \varphi} = U I.$$

2.9. Баланс потужності у колі змінного струму

Баланс потужностей визначається окремо для активного й реактивного навантаження. При цьому треба мати на увазі, що при зустрічному струмі крізь джерело ЕРС його кут φ збільшується на 180° . Це означає зміну знаку перед $\cos \varphi$ і $\sin \varphi$ на протилежний та дозволяє сформулювати умови балансу таким чином.

Для резистивних елементів: алгебраїчна сума активних потужностей джерел електричної енергії дорівнює сумі втрат потужності на всіх резистивних елементах електричного кола:

$$\sum_1^m E_k I_k \cos \varphi_k = \sum_1^n R_k I_k^2. \quad (2.31)$$

Для реактивних елементів: алгебраїчна сума реактивних потужностей джерел електричної енергії дорівнює різниці сум реактивних потужностей на всіх індуктивних і всіх ємнісних елементах електричного кола:

$$\sum_1^m E_k I_k \sin \varphi_k = \sum_1^n X_{L_k} I_k^2 - \sum_1^p X_{C_k} I_k^2. \quad (2.32)$$

2.10. Резонанс у колі змінного струму

При $X_L = X_C$ зникає реактивна складова і в електричному колі утворюється резонанс з кутовою частотою:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \right), \quad (2.33)$$

що визначається з умови $X_L = X_C \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C}$. При резонансі кут $\varphi = 0^\circ$, повна потужність дорівнює активній $P = S = UI$.

Розрізняють *резонанс напруги*, що виникає при послідовному з'єднанні R , L , C , і *резонанс струму*, що виникає при паралельному з'єднанні.

При резонансі напруги струм $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$ сягає максимального значення $I_{\max} = \frac{U}{R}$ при $f = f_p$ (рис. 2.15, а), через те що $X_L = X_C$, а напруга на ємності U_C може бути суттєво більшою за напругу U підключення електричного кола (рис. 2.15, б). З одного боку, це вимагає підвищеної обережності при роботі зі схемами, що містять конденсатори, з іншого боку, це використовується, коли треба підсилувати слабкий вхідний сигнал, досягаючи резонансної частоти f_p шляхом змінювання C або L (наприклад, у радіоприймачах).

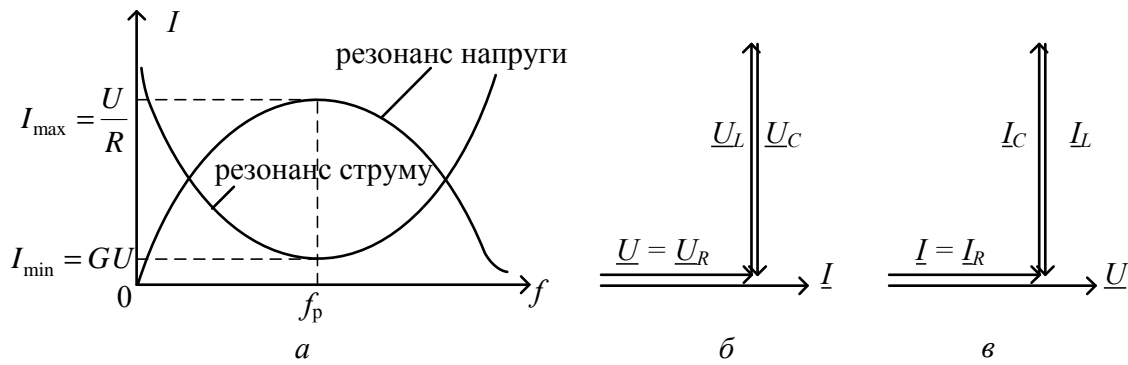


Рисунок 2.15

При резонансі струму він сягає мінімального значення (рис. 2.15, а): $I = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} \cdot U = GU$ при $f = f_p$, через те що $B_L = B_C$. У той же час струм у коливальному контурі $I_L = I_C$ може бути набагато більшим за струм I , що споживає схема (рис. 2.15, в). Це використовується в передавальних станціях з метою утворення потужних коливальних контурів при мінімальних втратах потужності на їх живлення, а також у механічних виробництвах, де використовуються асинхронні електро-двигуни, з метою покращання коефіцієнта потужності $\cos \varphi$.

Покращання коефіцієнта потужності електричної мережі

Струм, який передається до споживача активної потужності P , дорівнює $I = \frac{P}{U \cos \varphi_{ем}}$. Втрати в електричній мережі з опором проводів

$R_{пр}$ пропорційні квадрату цього струму $P_{пр} = \frac{R_{пр} P^2}{U^2 \cos^2 \varphi_{ем}}$. Ефективно

зменшувати ці втрати можна тільки шляхом збільшення $\cos \varphi$, через те що $U = \text{const}$, а активна потужність P визначається потребами споживача і не може змінюватися.

Розглянемо найбільш типову ситуацію, пов'язану з роботою асинхронного двигуна, який можна розглядати як котушку індуктивності в колі змінного струму.

З електричної мережі забирається струм $I = I_{дв}$, але тільки активна частина цього струму іде на корисну роботу (рис. 2.16, а).

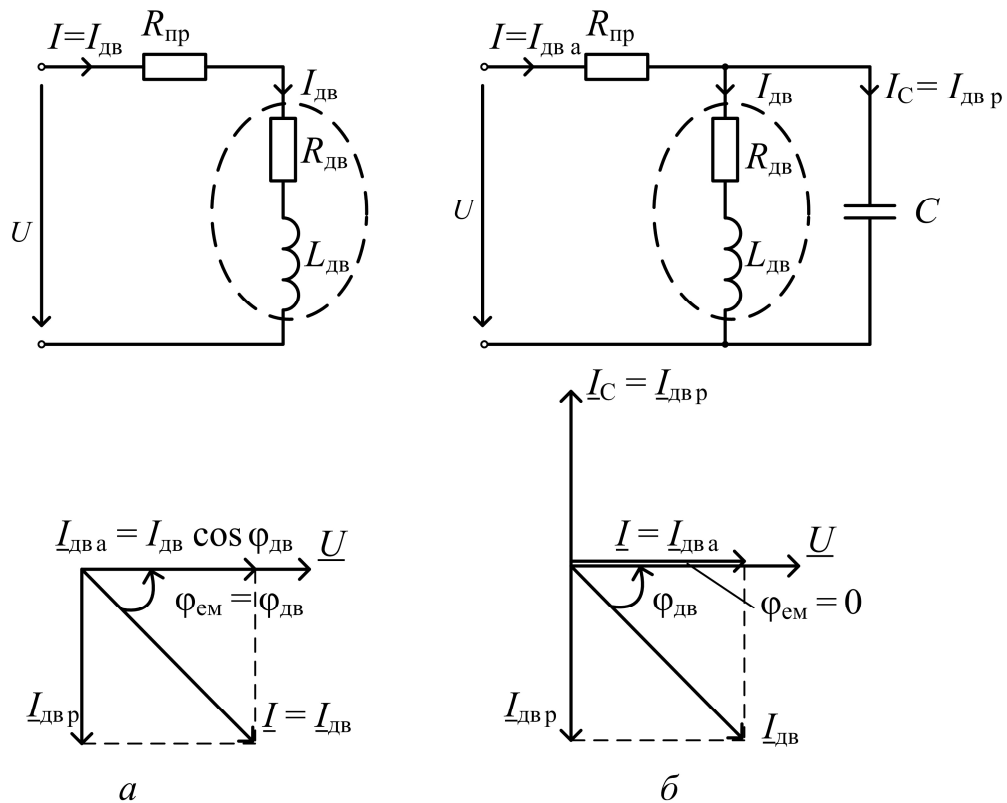


Рисунок 2.16

Кут $\varphi_{ем}$ електричної мережі дорівнює куту $\varphi_{дв}$ двигуна, і саме їм визначаються втрати в проводах електричної мережі. Але якщо паралельно двигуну приєднати конденсатор відповідної ємності C , то струм крізь нього компенсує реактивну складову струму двигуна й струм в електричній мережі зменшиться до $I = I_{дв а}$, а кут $\varphi_{ем}$ зменшиться до нуля (рис. 2.16, б), що призведе до помітного зменшення втрат у проводах електричної мережі.

Можна виділити три основні способи підвищення $\cos \varphi_{ем}$ електричної мережі:

- установка конденсаторних батарей;
- розташування в електричній мережі синхронних електричних машин, які можуть переходити в ємнісний режим роботи (режим синхронного компенсатора);
- уникання роботи ненавантажених асинхронних двигунів з $\cos \varphi_{дв} = 0,15-0,2$ (при роботі в режимах близьких до номінального $\cos \varphi_{дв} = 0,85-0,95$).

Запитання для самоконтролю

1. Яким чином можна отримати синусоїдні електричні величини: ЕРС, струм, напругу?
2. У яких формах і як конкретно можна подати ці синусоїдні електричні величини і якими параметрами вони характеризуються?
3. Сформулюйте й запишіть закони Кірхгофа для електричного кола змінного синусоїдного струму.
4. Які ідеальні елементи застосовують у схемах заміщення електричних кіл синусоїдного струму?
5. Якими опорами та провідностями характеризуються ідеальні елементи синусоїдного струму?
6. Які існують співвідношення суносоїдних напруг і струмів на ідеальних елементах з послідовним з'єднанням?
7. Які існують співвідношення суносоїдних напруг і струмів на ідеальних елементах з паралельним з'єднанням?
8. Як будують векторні діаграми при розрахунку електричних кіл з послідовним і паралельним з'єднанням приймачів?
9. Якими потужностями характеризуються енергетичні процеси в електричних колах синусоїдного струму: як визначаються ці потужності і як вони пов'язані між собою?
10. Які умови виникнення резонансу напруг і які співвідношення основних електричних величин у цьому режимі?
11. Які умови виникнення резонансу струмів і які співвідношення основних електричних величин у цьому режимі?
12. У чому полягає перевірка розрахунку електричних кіл синусоїдного струму за законами Кірхгофа та за енергобалансом?
13. У яких формах можна подавати комплексні значення струмів, ЕРС, напруг і опорів і як переходять від однієї форми до іншої при розрахунках?
14. Що таке комплексні опори і як їх розраховують?
15. У чому полягає проблема підвищення коефіцієнта потужності у електричних системах і як її вирішують?

Розділ 3

ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

В сучасних умовах електроенергія виробляється, передається та розподіляється в основному як енергія трифазної системи синусоїдальний струмів.

Симетрична трифазна система ЕРС являє собою сукупність трьох синусоїдних ЕРС однакових амплітуди та частоти, зсунутих друг відносно друга по фазі на одну третину періоду, тобто на 120° . У порівнянні з однофазною трифазна система електричних кіл має важливі техніко-економічні переваги:

1. Трифазні генератори, електродвигуни та трансформатори на ту ж потужність компактніше, більш легкі (вимагають менше метала – міді та сталі) та дешевше у виготовленні.

2. Від одного джерела електроенергії в трифазній мережі можна отримати для споживачів дві напруги (лінійну та фазну), які відрізняються в $\sqrt{3}$ раз.

3. Значно (до 30 %) економляться кольорові метали (мідь, алюміній) та залізо в дротах електричних мереж.

4. Трифазною системою струмів легко утворюється обертове магнітне поле, яке використовується в найбільш простих, дешевих та надійних в роботі трифазних асинхронних електродвигунах та в інших електричних машинах.

3.1. Трифазне джерело ЕРС

Якщо розташувати три однакові котушки генератора синусоїдного змінного струму таким чином, що їх магнітні осі будуть перетинатися під кутом 120° , а всередині обертатиметься з кутовою частотою ω магнітний потік Φ_m від електромагніта або постійного магніту (рис. 3.1, *a*), то в кожній з цих котушок буде наводитися фазна ЕРС з однаковим амплітуд-

ним значенням E_m і зсунутими на 120° початковими фазами:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t ; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) ; \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ) . \end{aligned} \quad (3.1)$$

Напруга на затискачах котушок буде дорівнювати фазним ЕРС: між затискачами A і X $u_A = e_A$; між затискачами B і Y $u_B = e_B$; між затискачами C і Z $u_C = e_C$ (рис. 3.1, б).

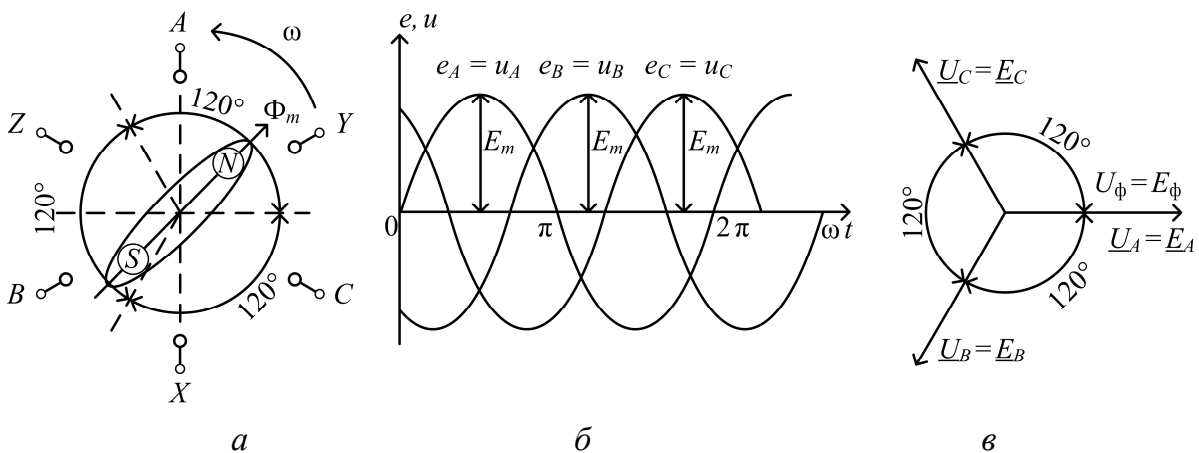


Рисунок 3.1

Відповідно й на векторній діаграмі діючих значень фазних ЕРС і напруг для всіх фаз $U_\phi = E_\phi$ (рис. 3.1, в)

У залежності від того, як будуть з'єднані між собою фазні джерела ЕРС E_A, E_B, E_C , між лінійними проводами, до яких вони приєднуються, встановиться відповідна лінійна напруга.

При з'єднанні фазних котушок «зіркою» (або «зіркою з нейтраллю») (рис. 3.2, а) лінійні напруги U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , які по модулю однакові й дорівнюють $U_{\text{л}}$ (рис. 3.2, б), відповідно до другого закону Кірхгофа пов'язані з фазними ЕРС і напругами таким чином:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = \underline{E}_A - \underline{E}_B ; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C = \underline{E}_B - \underline{E}_C ; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = \underline{E}_C - \underline{E}_A . \end{aligned}$$

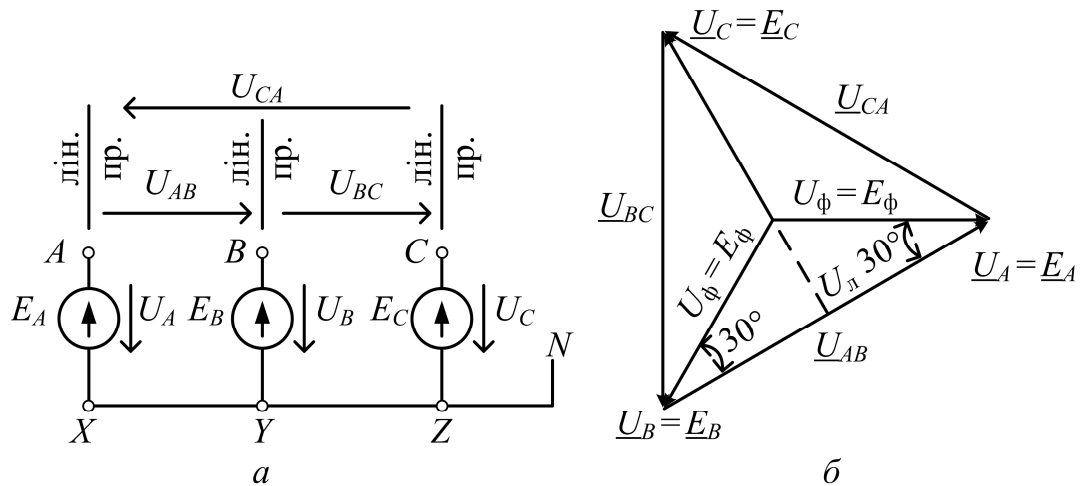


Рисунок 3.2

Всі ці вектори утворюють на векторній діаграмі однакові рівнобедрені трикутники з кутами 30° в основі (рис. 3.2, б). Відповідно, при з'єднанні фазних котушок трифазного джерела ЕРС «зіркою» зв'язок між лінійною $U_{л}$ і фазною U_{ϕ} напругами і ЕРС буде таким:

$$U_{л} = 2 \cdot U_{\phi} \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot U_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} U_{\phi}. \quad (3.2)$$

При з'єднанні фазних котушок «трикутником» (рис. 3.3, а) затискачі X і B, Y і C, Z і A з'єднані накоротко й знаходяться під однаковим потенціалом.

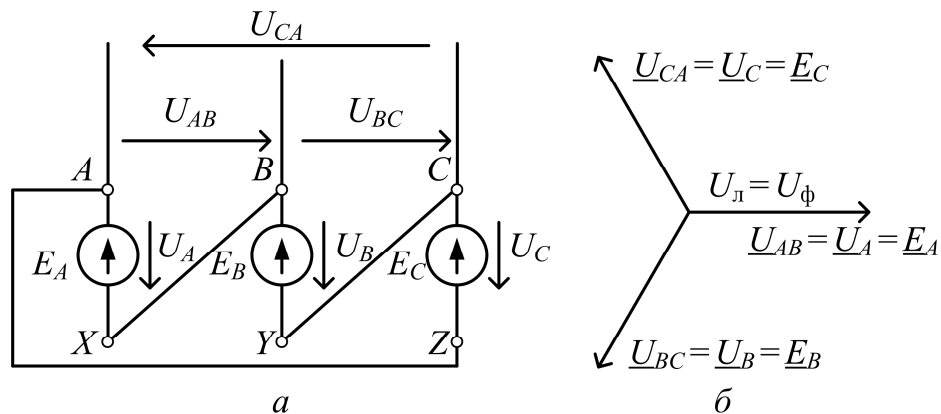


Рисунок 3.3

Тому, відповідно до другого закону Кірхгофа, $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A = \underline{E}_A$; $\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B = \underline{E}_B$; $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C = \underline{E}_C$, що також відображено на векторній діаграмі (рис. 3.3, б). Таким чином, при з'єднанні фазних котушок трифазного джерела ЕРС «трикутником»:

$$U_{л} = U_{\phi} = E_{\phi}. \quad (3.3)$$

3.2. Підключення споживачів до трифазної лінії електропередачі

Найпоширенішою є чотирипровідна лінія, що складається з лінійних проводів фаз A, B, C і нейтрального проводу N (рис. 3.4).

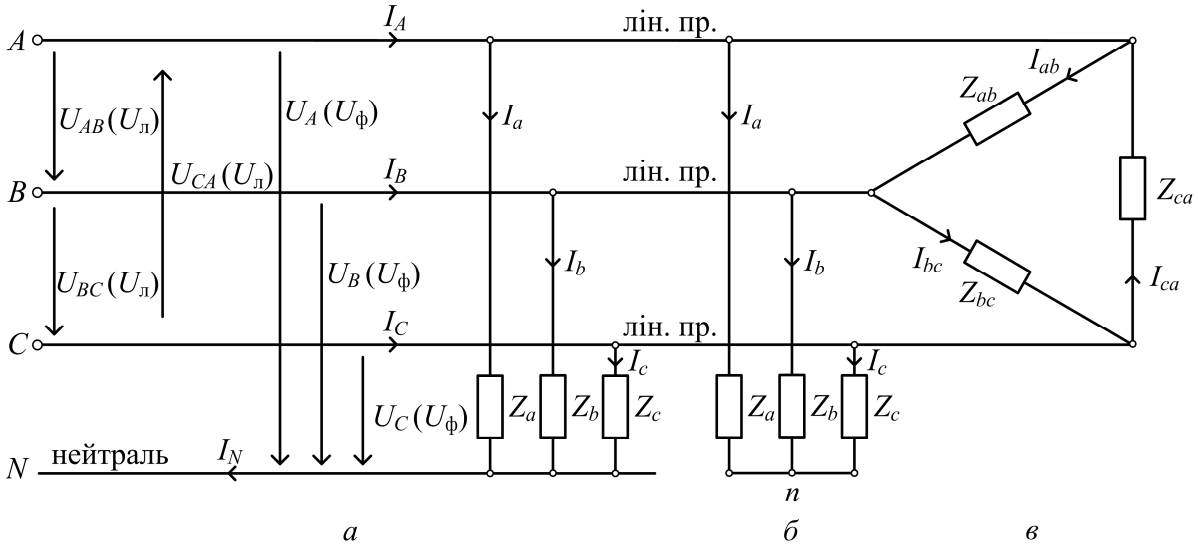


Рисунок 3.4

У ряді випадків можна обмежитися трипровідною лінією, яка налічує тільки лінійні проводи фаз A, B, C . Напряга між лінійними проводами $U_{л}$ називається «лінійною», а напряга на фазному споживачеві $U_{ф}$ – «фазною».

Підключення фазних споживачів між лінійними проводами і нейтраллю (рис. 3.4, *a*) називається «підключення зіркою з нейтраллю». Підключення фазних споживачів від лінійних проводів на загальний вузол n (рис. 3.4, *б*) називається «підключенням зіркою». Коли фазні споживачі підключаються між лінійними проводами (рис. 3.4, *в*) це буде «підключення трикутником».

Симетричне навантаження

Якщо опори фазних споживачів дорівнюють один одному як по величині (однакові модулі), так і по фазі (однакові аргументи), таке навантаження буде *симетричним*. При з'єднанні «зіркою з нейтраллю» або «зіркою» це означає, що $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_ф$, а при з'єднанні «трикутником» –

$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_{\phi}$. Фазні струми $I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}}$ будуть однакові у всіх фазах і зсунуті між собою на 120° .

Приклади векторних діаграм при симетричному навантаженні показані на рис. 3.5: *а* – для з'єднання «зіркою з нейтраллю» або «зіркою»; *б* – для з'єднання «трикутником».

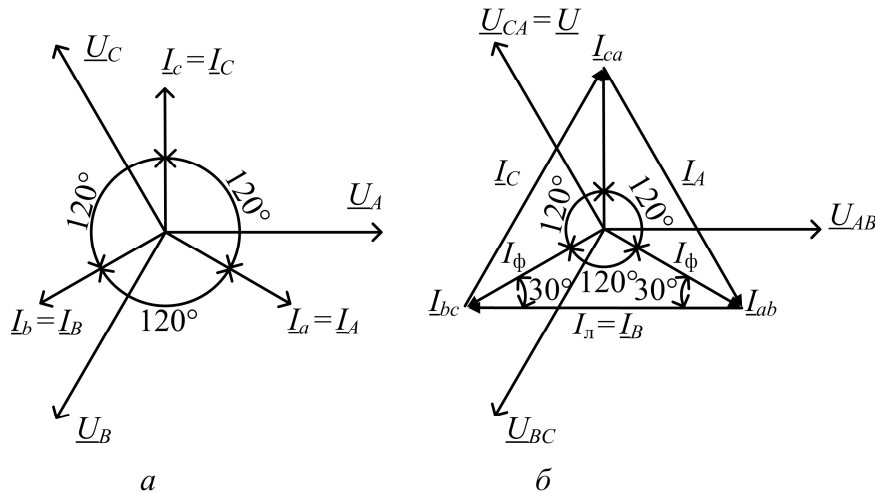


Рисунок 3.5

При з'єднанні «зіркою з нейтраллю» за першим законом Кірхгофа $\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$. При симетричному навантаженні сума цих векторів дорівнює нулю. Тобто струм у нейтралі відсутній, і з'єднання «зіркою з нейтраллю» рівнозначне з'єднанню «зіркою». По модулю фазна напруга на споживачеві U_{ϕ} і лінійна напруга $U_{\text{л}}$ будуть співвідноситися як і для трифазного джерела ЕРС:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}. \quad (3.3)$$

Відповідні фазні напруги будуть такими:

$$\underline{U}_A = U_{\phi} e^{j0^{\circ}}; \underline{U}_B = U_{\phi} e^{-j120^{\circ}}; \underline{U}_C = U_{\phi} e^{j120^{\circ}}.$$

Їм будуть дорівнювати напруги на фазних споживачах:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A; \underline{U}_b = \underline{U}_B; \underline{U}_c = \underline{U}_C.$$

Лінійні струми при з'єднанні «зіркою з нейтраллю» або «зіркою» дорівнюють фазним:

$$I_{\text{л}} = I_{\phi}, \text{ тобто } I_A = I_a; I_B = I_b; I_C = I_c.$$

При з'єднанні «трикутником»:

$$U_{\phi} = U_{\text{л}}. \quad (3.4)$$

Відповідно до першого закону Кірхгофа (рис. 3.4, в) лінійні й фазні струми пов'язані таким чином:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

З векторної діаграми видно, що фазні струми $I_{\phi} = I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$ утворюють рівнобедрені трикутники з лінійними струмами $I_{\text{л}} = I_A = I_B = I_C$ (рис. 3.5, б). У цих трикутниках:

$$I_{\text{л}} = 2 \cdot I_{\phi} \cos 30^{\circ} = 2I_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2} = I_{\phi} \sqrt{3}. \quad (3.5)$$

Підсумовуючи, можна відзначити, що при симетричному навантаженні з'єднання «зірка з нейтраллю» і «зірка» рівнозначні, фазні споживачі знаходяться під напругою $U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$, а лінійний струм дорівнює фазному $I_{\text{л}} = I_{\phi}$.

При з'єднанні «трикутником» напруга на фазних споживачах $U_{\phi} = U_{\text{л}}$, а лінійний струм при симетричному навантаженні $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi}$.

Несиметричне навантаження

Несиметричне навантаження виникає, якщо опори фазних споживачів різняться. Несиметричне навантаження може нормально реалізувати тільки при з'єднаннях «зірка з нейтраллю» і «трикутник».

Пояснюється це тим, що для цих з'єднань за будь-якою несиметрією фазні напруги залишаються незмінними:

при з'єднанні «зірка з нейтраллю» $U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$ (рис. 3.6, а);

при з'єднанні «трикутник» $U_{\phi} = U_{\text{л}}$ (рис. 3.6, б)

Несиметрія навантаження призводить до несиметрії фазних і лінійних струмів.

При з'єднанні «зірка з нейтраллю» несиметрія фазних струмів ком-

пенсується появою струму в нейтралі (рис. 3.6, а). При з'єднанні «трикутником» несиметрія фазних струмів призводить до несиметрії лінійних струмів (рис. 3.6, б).

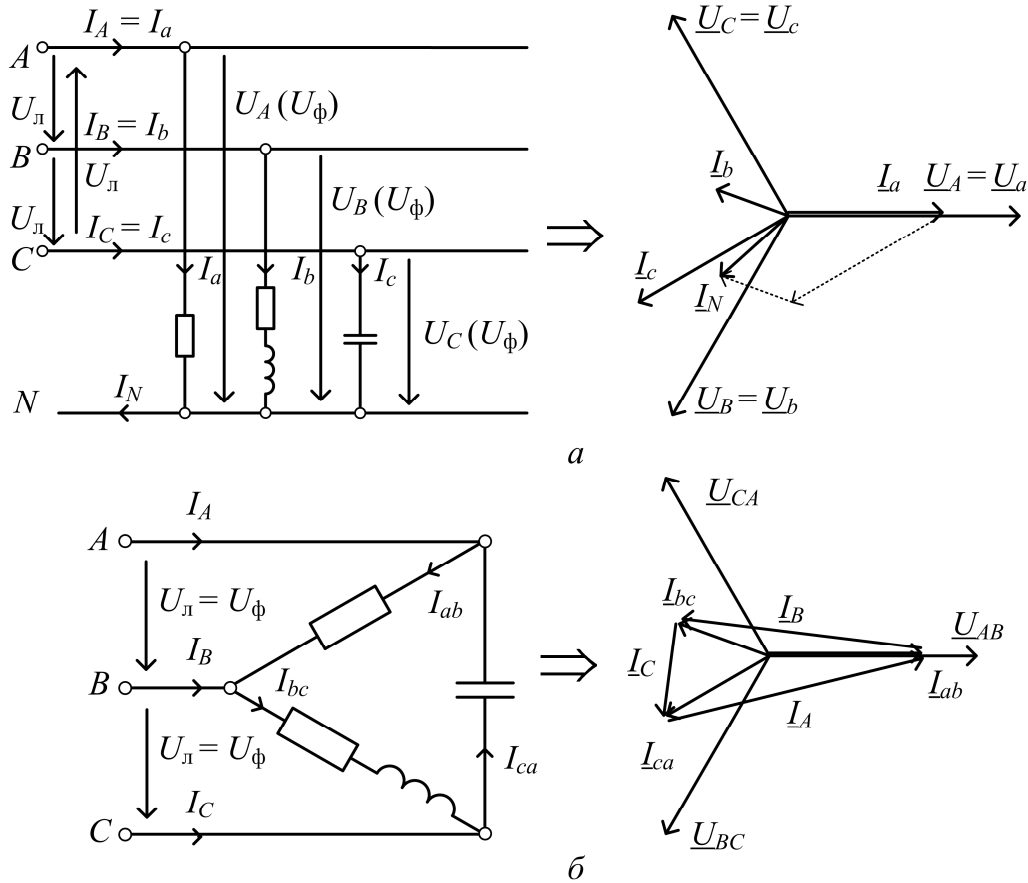


Рисунок 3.6

З'єднання «зірка» при несиметричному навантаженні може виникнути

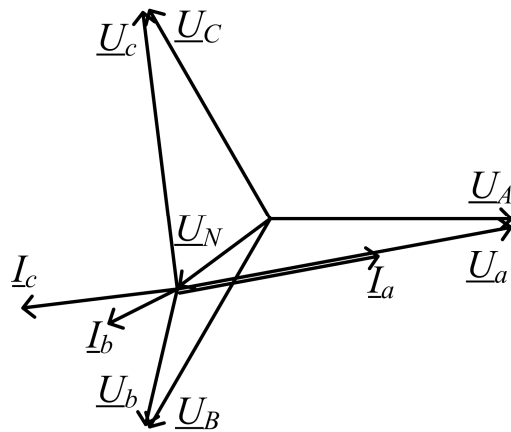


Рисунок 3.7

ти тільки в наслідок аварії (обрив нейтрального проводу, струм в якому зникає, $-I_N = 0$). При цьому в місці обриву виникає так звана напруга на нейтралі U_N , яка векторно віднімається від фазних напруг електричної мережі: $\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N$; $\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N$; $\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N$ - утворюючи перекид фазних напруг на споживачах (рис. 3.7).

Сума фазних струмів відповідно до першого закону Кірхгофа стає дорівнювати нулю: $(\underline{U}_A - \underline{U}_N)\underline{Y}_a + (\underline{U}_B - \underline{U}_N)\underline{Y}_b + (\underline{U}_C - \underline{U}_N)\underline{Y}_c = 0$, де $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ – провідність фазних споживачів.

Скориставшись цим чисельно і векторно визначаємо \underline{U}_N :

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}. \quad (3.6)$$

3.3. Потужність у трифазному колі

Незалежно від виду навантаження й з'єднання фазних споживачів загальна потужність трифазного кола дорівнює сумі потужностей окремих фаз:

$$S_{3\phi} = S_a + S_b + S_c;$$

$$P_{3\phi} = P_a + P_b + P_c;$$

$$Q_{3\phi} = Q_a + Q_b + Q_c.$$

При симетричному навантаженні з'єднанню «зіркою» відповідає повна потужність $S_{3\phi} = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi = 3 \frac{U_\phi}{\sqrt{3}} \cdot I_\phi = \sqrt{3} U_\phi I_\phi$. При з'єднанні «трикутником» – $S_{3\phi} = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi = 3U_\phi \frac{I_\phi}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} U_\phi I_\phi$.

Тобто незалежно від того, як з'єднані фазні споживачі, при симетричному навантаженні повна потужність $S_{3\phi} = \sqrt{3} U_\phi I_\phi$.

Відповідно, активна і реактивна потужності будуть мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} P_{3\phi} &= \sqrt{3} U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; \\ Q_{3\phi} &= \sqrt{3} U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Запитання для самоконтролю

1. Яким чином можна отримати трифазну систему синусоїдних ЕРС та напругу?
2. Дайте визначення симетричної трифазної системи ЕРС. Запишіть вирази для миттєвих значень ЕРС, їхні комплексні діючі значення та побудуйте векторну діаграму.
3. Зобразіть схеми з'єднання фаз обмотки трифазного генератора «зіркою» і «трикутником»; дайте визначення фазних і лінійних напруг та вкажіть співвідношення між ними в цих схемах.
4. Як можна вмикати однофазні та трифазні приймачі у трифазну мережу?
5. Зобразіть трифазний приймач, який має схему «зірка», та вкажіть на цій схемі фазні та лінійні напруги і струми.
6. Зобразіть трифазний приймач, який має схему «трикутник», та вкажіть на цій схемі фазні та лінійні напруги і струми.
7. Які співвідношення між лінійними й фазними струмами і напругами при симетричному навантаженні (з'єднання «зіркою» і «трикутником»)?
8. Яке призначення нейтрального проводу?
9. Що таке зміщення нейтралі, в яких випадках воно виникає і як його розрахувати?
10. Запишіть формули визначення активної, реактивної та повної потужностей трифазного кола.

Розділ 4

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ

Перехідні процеси виникають в електричному колі при різного роду комутаційних переключеннях, пов'язаних з підключенням і відключенням споживачів, джерел електричної енергії, аварійними ситуаціями та іншим. Електричне коло переходить з одного рівня напруг і струмів (початкових) на інший. По закінченні цього процесу встановлюються нові, усталені значення напруги u_y і струму i_y , які визначаються відповідно до зміненого електричного кола.

Перехідні ж струми і напруги мають дві складові – крім усталеної ще й вільну, яка відповідає протіканню перехідного процесу без впливу джерел електричної енергії до його повного нівелювання.

Таким чином напруга і струм під час перехідного процесу можуть бути подані у вигляді:

$$u = u_y + u_B; i = i_y + i_B, \quad (4.1)$$

де u_y, i_y – усталені значення напруги і струму; u_B, i_B – вільні значення напруги і струму.

При цьому вважаємо, що параметри функціональних елементів електричного кола (R, L, C) під час перехідного процесу не змінюються.

4.1. Закони комутації

Струм при проходженні крізь індуктивність не може змінюватися стрибком.

Пояснюється це тим, що зміна струму змінює енергію магнітного поля, пов'язаного з індуктивністю L . Якщо це відбувається за проміжок часу $\Delta t = t_2 - t_1$, то витрачається потужність:

$$P = \frac{\Delta W_M}{\Delta t} = \frac{L}{2} \cdot \frac{i^2(t_2) - i^2(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (4.2)$$

яка не може сягати безкінечності при $(t_2 - t_1) \rightarrow 0$, що відповідало би кінцевій різниці струму $[i(t_2) - i(t_1)]$, тобто його стрибку.

Напруга прикладена до ємності C не може змінюватися стрибком.

Пояснюється це тим, що зміна напруги змінює енергію електричного поля, пов'язаного з ємністю C . Потужність, що витрачається на цю зміну:

$$P = \frac{\Delta W_e}{\Delta t} = \frac{C}{2} \cdot \frac{u^2(t_2) - u^2(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (4.3)$$

не може сягати безкінечності при $(t_2 - t_1) \rightarrow 0$, що відповідало би кінцевій різниці напруги $[u(t_2) - u(t_1)]$, тобто її стрибку.

4.2. Загальні принципи аналізу перехідних процесів

Перехідні процеси у лінійних електричних колах описують за допомогою лінійних диференціальних рівнянь, складених на основі законів Ома і Кірхгофа для миттєвих значень електричних величин, що застосовуються при будь-якому стані електричного кола. Отримані на їх основі лінійні диференціальні рівняння перехідного процесу після розв'язання дають можливість визначити значення струмів та напруг у будь-який момент часу. Постійні інтегрування визначаються виходячи з початкових умов процесу з урахуванням законів комутації.

Струм і напруга на R , L , C параметрах пов'язані виразами, відповідно:

$$u_R = iR; \quad u_L = L \frac{di}{dt}; \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt \Leftrightarrow i = C \frac{du_C}{dt}. \quad (4.4)$$

Струм або напруга визначаються загальним інтегралом диференціального рівняння з урахуванням ЕРС. Загальний інтеграл рівняння представляє собою суму часткового розв'язання цього рівняння і розв'язання без урахування ЕРС.

Як було вказано (4.1) пошуковий струм (або напруга) згідно принципу накладання (суперпозиції) зручно представити сумою двох складових: усталеною i_y і вільної i_B , тобто:

$$i(t) = i_y + i_B.$$

В усталеному режимі, який теоретично настає при $t \rightarrow \infty$, а практично – при $t = (3...4)\tau$, де τ – стала часу, результуючий струм визначається новими параметрами електричного кола.

Вільна складова струму i_B визначається розв'язанням диференціального рівняння з вилученням ЕРС.

Розглянемо кілька прикладів перехідних процесів.

4.3. Вмикання котушки індуктивності у коло постійного струму

Початкові умови: при $t = 0$; $i = 0$.

За другим законом Кірхгофа (рис. 4.1, а)

$$u_L + u_R = E, \text{ де } u_L = L \frac{di}{dt}, \quad u_R = Ri.$$

Загальне розв'язання $i = i_y + i_B$, де $i_y = \frac{E}{R}$, а

i_B знаходимо з диференційного рівняння:

$$L \frac{di_B}{dt} + Ri_B = 0 \quad (4.5)$$

(вилучено джерело електричної енергії E).

Характеристичне рівняння для диференційного рівняння (4.5) $Lp + R = 0$, що надає $p = -\frac{R}{L}$.

Його загальне розв'язання $i_B = Ae^{pt}$.

Вводимо поняття «стала часу» $\tau = \frac{L}{R}$, тоді розв'язання диференційного рівняння (4.5) для i_B

має вигляд $i_B = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$, а $i = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$.

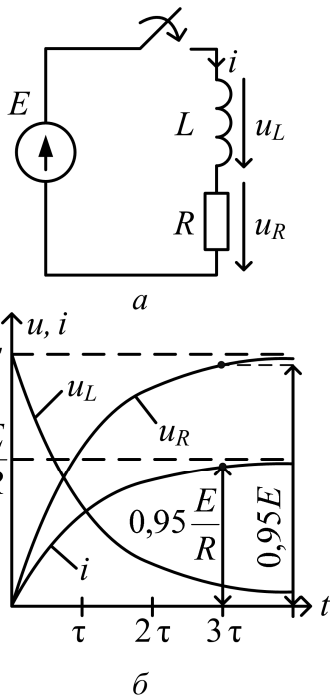


Рисунок 4.1

Сталу інтегрування A знаходимо з початкових умов: $0 = \frac{E}{R} + A e^{-\frac{0}{\tau}}$.

Звідки $A = -\frac{E}{R}$. Відповідно,

$$\begin{aligned} i &= \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right); \\ u_R &= R i = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right); \\ u_L &= L \frac{di}{dt} = E e^{-\frac{t}{\tau}}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

У більшості випадків перехідний процес можна вважати таким, що закінчився при $t = 3\tau$ (до усталеного значення не дістає 5 % його величини). Як змінюються i , u_R , u_L показано на рис. 4.1, б.

4.4. Вимикання котушки індуктивності з кола постійного струму

4.4.1. Пряме вимикання

Спочатку розглянемо схему з шунтуванням розмикаючого ключа $R_{\text{кл}}$ (хоча б завдяки іскровому проміжку) (рис. 4.2, а).

Початкові умови: при $t = 0$; $i = \frac{E}{R}$.

За другим законом Кірхгофа:

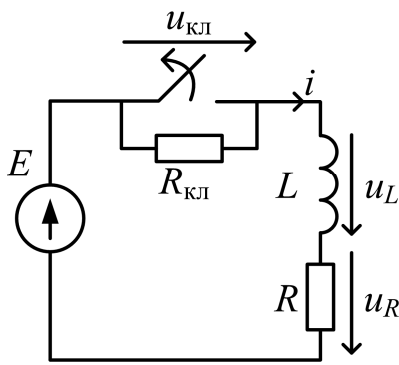
$u_{\text{кл}} + u_L + u_R = E$, або, згрупувавши $R_{\text{кл}}$ і R ,

$$L \frac{di}{dt} + (R_{\text{кл}} + R) i = E, \quad (4.7)$$

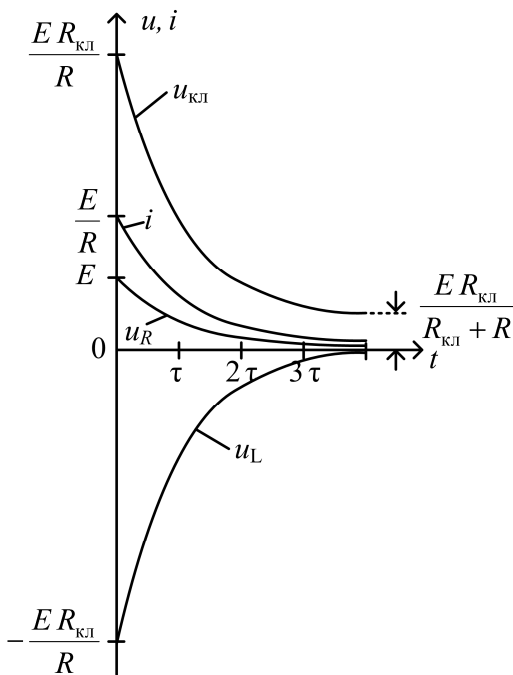
де $R_{\text{кл}} \gg R$.

Струм крізь котушку шукаємо у вигляді $i = i_y + i_b$, де $i_y = \frac{E}{R_{\text{кл}} + R}$, а

i_b знаходимо з диференційного рівняння $L \frac{di_b}{dt} + (R_{\text{кл}} + R) i_b = 0$ (вилучено джерело електричної енергії E). Розв'язання подібного диференційного рівняння вже розглядалось.



а



б

Рисунок 4.2

Змінення i , u_R , $u_{KЛ}$, u_L показано на рис. 4.2, б.

Треба відзначити, що при вимиканні котушки індуктивності спостерігається стрибок напруги на вимикачеві $\left(\frac{ER_{KЛ}}{R} \gg E\right)$ й у самій котушці $\left(u_L|_{t=0} = -\frac{ER_{KЛ}}{R}\right)$.

Його розв'язання має вигляд:

$$i_B = A e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ де } \tau = \frac{L}{R_{KЛ} + R} - \text{ стала часу.}$$

Загальне розв'язання для струму:

$$i = i_y + i_B = \frac{E}{R_{KЛ} + R} + A e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.8)$$

Сталу інтегрування A знаходимо з

початкових умов: $\frac{E}{R} = \frac{E}{R_{KЛ} + R} + A e^{-\frac{0}{\tau}},$

звідки $A = \frac{ER_{KЛ}}{R(R_{KЛ} + R)}.$

Відповідно,

$$i = \frac{E}{R_{KЛ} + R} \left(1 + \frac{R_{KЛ}}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \right);$$

$$u_R = \frac{ER}{R_{KЛ} + R} \left(1 + \frac{R_{KЛ}}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \right); \quad (4.9)$$

$$u_{KЛ} = \frac{ER_{KЛ}}{R_{KЛ} + R} \left(1 + \frac{R_{KЛ}}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \right);$$

$$u_L = -\frac{ER_{KЛ}}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Стає можливим дуговий розряд між контактами, що розмикаються. Це може викликати пробій ізоляції, вихід з ладу вимірювальних приладів, іскру і навіть дугу між контактами апарата, що відключає.

Запобігти цьому можна за допомогою розрядного резистора R_p .

4.4.2. Вимикання з розрядним резистором

На рис. 4.3, а показана схема відключення котушки індуктивності з використанням розрядного резистора.

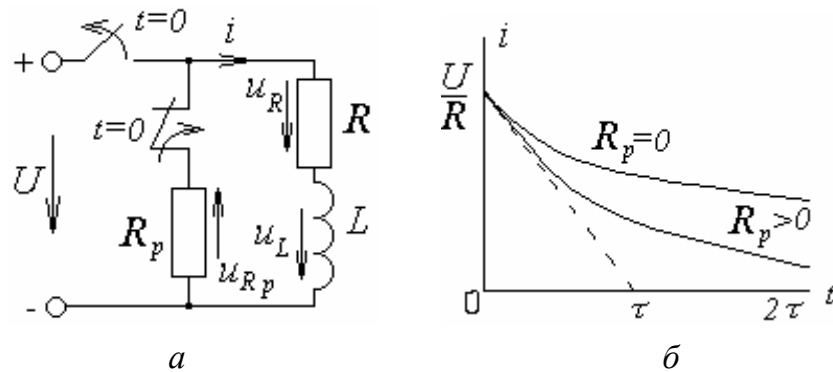


Рисунок 4.3

Після одночасного розмикання одного ключа і замикання іншого рівняння для замкненого кола за другим законом Кірхгофа буде таким:

$$u_R + u_{R_p} + u_L = 0.$$

Після підстановки (4.4) отримаємо однорідне диференціальне рівняння:

$$Ri + R_p i + L \frac{di}{dt} = 0. \quad (4.10)$$

Перепишемо,

$$L \frac{di}{dt} + R_e i = 0,$$

де $R_e = R + R_p$ – еквівалентний активний опір.

З рівняння (4.10) видно, що усталена складова струму $i_y = 0$. Тому струм визначається тільки вільною складовою:

$$i = i_v = Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4.11)$$

де $\tau = \frac{L}{R_e} = \frac{L}{R + R_p}$ – постійна часу кола.

Знаходимо сталу A за першим законом комутації. До розмикання ключа $i = \frac{U}{R}$, а після комутації ключів при $t = 0$ струм зберігається і від-

повідно до рівняння (4.11) $A = \frac{U}{R}$, а

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.12)$$

ЕРС самоіндукції у котушці:

$$\begin{aligned} e_L = -u_L = -L \frac{di}{dt} &= -L \frac{d}{dt} \left(\frac{U}{R} e^{-\frac{R+R_p}{L}t} \right) = L \frac{U}{R} \frac{R+R_p}{L} e^{-\frac{R+R_p}{L}t} = \\ &= U \frac{R+R_p}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = \left(1 + \frac{R_p}{R} \right) \cdot U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

В момент $t = 0$ ЕРС миттєво зростає від 0 до максимального значення:

$$e_{L_{\max}} = \left(1 + \frac{R_p}{R} \right) \cdot U. \quad (4.14)$$

Аналіз рівняння (4.14) приведе до важливих практичних висновків:

1. Якщо опір розрядного резистора $R_p = 0$, тобто котушка індуктивності замикається накоротко, то ЕРС самоіндукції буде мінімальною:

$$e_L = U = e_{L_{\min}}. \quad (4.15)$$

При цьому перехідний процес протікає до тих пір, доки енергія магнітного поля котушки $W_M = \frac{L i^2}{2}$ не перетвориться у тепло в опорі R (рис. 4.3, б).

2. Якщо опір R_p великий (повітря), то ЕРС самоіндукції набирає більшого значення, що приводить до пробоя повітряного проміжку вимикача; з'являється електрична дуга на контактах.

3. Практично обирають опір розрядного резистора $R_p = (4-8)R$, що обмежує перенапругу в момент відмикання кола з індуктивністю до чотирьох – восьмикратної напруги джерела. Перенапруги на індуктивній котушці використовуються в ряді пристроїв для отримання високих

напруг. На цьому принципі побудовані різні перетворювачі низької постійної напруги у високу.

4.5. Підключення індуктивної котушки до джерела синусоїдної напруги

При вмиканні індуктивної котушки з параметрами R і L до джерела синусоїдної напруги (рис. 4.4, а):

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (4.16)$$

де ψ_u – початкова фаза напруги джерела;

в колі встановлюється синусоїдний усталений струм

$$i_y = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi), \quad (4.17)$$

який буде відставати за фазою від напруги на кут $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$, де

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \text{ – амплітуда струму; } X_L = \omega L = 2\pi f L.$$

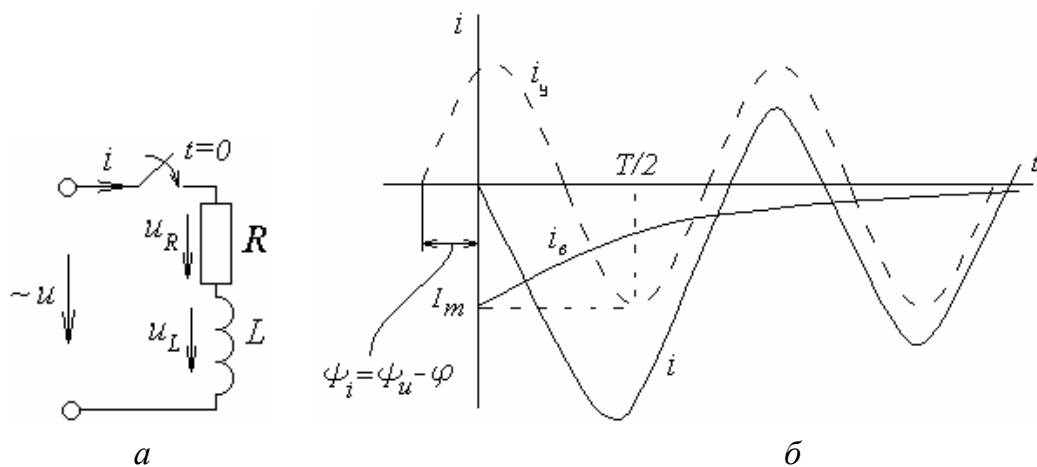


Рисунок 4.4

Для розглядуваного кола в кожний момент часу за другим законом Кірхгофа можна записати $u_L + u_R = u$;

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i = u. \quad (4.18)$$

Це диференціальне рівняння першого порядку, відтак вільна складова струму дорівнює:

$$i_b = Ae^{pt}, \quad (4.19)$$

де $p = -\frac{R}{L}$ – корінь характеристичного рівняння.

Загальне розв'язання цього диференціального рівняння будемо шукати у вигляді $i = i_y + i_b$, або після підстановки (4.17) і (4.19) отримуємо:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) + Ae^{-\frac{R}{L}t}. \quad (4.20)$$

За першим законом комутації можемо зазначити, що до замикання ключа струм був відсутнім ($i = 0$), а в перший момент після вмикання ключа (із рівняння (4.20)) отримуємо:

$$0 = I_m \sin(\psi_u - \varphi) + A,$$

звідки знаходимо

$$A = -I_m \sin(\psi_u - \varphi). \quad (4.21)$$

Підставляючи це значення в рівняння (4.20) отримуємо загальне розв'язання для перехідного процесу в колі синусоїдної напруги:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) - I_m \sin(\psi_u - \varphi)e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (4.22)$$

Як витікає з останнього рівняння і рис. 4.4, б характер перехідного процесу при підключенні котушки індуктивності до джерела синусоїдної напруги суттєво залежить від вільної складової струму, яка визначається параметрами котушки R і L та напруги в момент вмикання.

Якщо у момент комутації ($t = 0$) $\psi_u = \varphi$, то $i_b = 0$ і перехідного процесу не відбувається – відразу після включення встановлюється синусоїдний струм.

Якщо $\psi_u = \varphi + \frac{\pi}{2}$, то у момент $t \sim T/2$ амплітуда струму може досягати подвійного максимального значення $i \approx 2I_m$ сталого струму (рис. 4.4, б). В результаті на котушці індуктивності виникне перенапруга.

4.6. Зарядка конденсатора

Початкові умови: при $t = 0$; $u_C = 0$. Струм крізь ємність $i = C \frac{du_C}{dt}$.

За другим законом Кірхгофа (рис. 4.5, а) $u_R + u_C = E$, що подає диференційне рівняння відносно u_C :

$$R_0 C \frac{du_C}{dt} + u_C = E, \quad (4.23)$$

$u_C = u_{Cy} + u_{Cb}$, де $u_{Cy} = E$, а u_{Cb} знаходимо з диференційного рівняння

$$R_0 C \frac{du_{Cb}}{dt} + u_{Cb} = 0 \quad (\text{вилучено джерело електричної енергії } E).$$

Розв'язання подібного диференційного рівняння вже розглядалось.

Його розв'язання має вигляд:

$$u_{Cb} = A e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \text{де } \tau = R_0 C \text{ – стала часу.}$$

Загальне розв'язання:

$$u_C = u_{Cy} + u_{Cb} = E + A e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Сталу інтегрування A знаходимо з почат-

кових умов: $0 = E + A e^{-\frac{0}{\tau}}$, звідки $A = -E$.

Відповідно,

$$u_C = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right);$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R_0} e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (4.24)$$

$$u_R = R_0 i = E e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Треба відзначити, що при зарядці конденсатора в першу мить вини-

кає стрибок струму $\left(i|_{t=0} = \frac{E}{R_0} \right)$ (рис. 4.5, б), який обмежує опір R_0 .

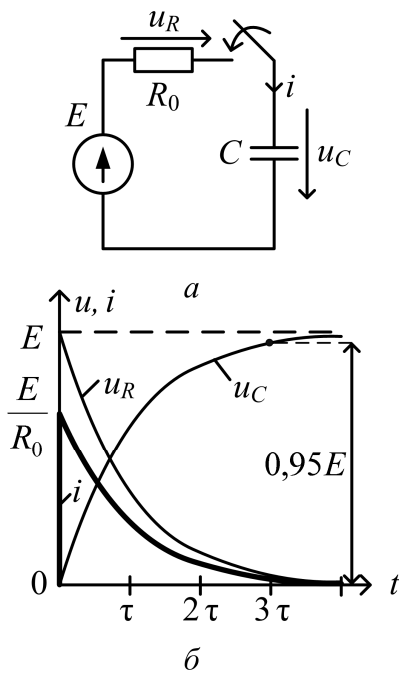


Рисунок 4.5

4.7. Розрядка конденсатора на резистор

Розрядка конденсатора на резистор (рис. 4.6, а). Початкові умови: при $t=0$; $u_C = E$. Струм крізь ємність спрямований зустрічно до u_C , тому $i = -C \frac{du_C}{dt}$.

У контурі розрядки відсутнє джерело ЕРС, тому $u_C = u_{CB}$, і у відповідності з другим законом Кірхгофа $u_R - u_C = 0$, що надає диференціальне рівняння відносно u_C (помножуємо на «мінус одиницю»):

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0. \quad (4.25)$$

Його розв'язання:

$$u_C = A e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ де } \tau = RC \text{ – стала часу.}$$

З початкових умов знаходимо $A = E$.

Відповідно,

$$u_C = u_R = E e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (4.26)$$

$$i = -C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

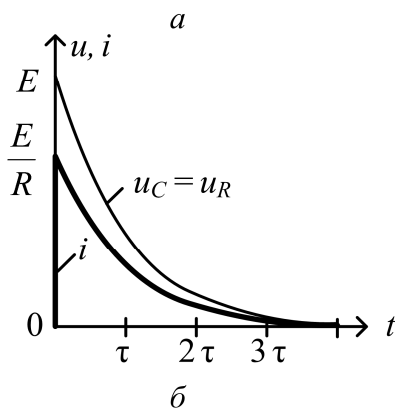
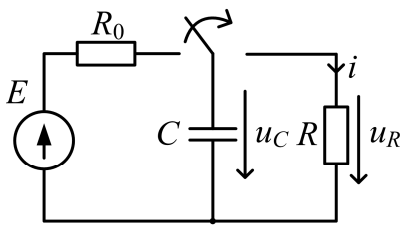


Рисунок 4.6

Як і при зарядці конденсатора, у першу мить його розрядки, виникає стрибок струму

$$\left(i|_{t=0} = \frac{E}{R} \right), \text{ який обмежує розрядний резистор } R \text{ (рис. 4.6, б).}$$

Тому при роботі з конденсаторами треба бути вкрай обережними, щоб не бути ураженими струмом.

4.8. Розрядка конденсатора на котушку індуктивності

Початкові умови: $t=0$; $i=0$, $u_C = E$. Струм крізь ємність спрямований зустрічно до u_C , тому $i = -C \frac{du_C}{dt}$. У контурі розрядки відсутнє

джерело ЕРС, тому $u_C = u_{CB}$, і у відповідності з другим законом Кірхгофа (рис. 4.7, а) $u_L + u_R - u_C = 0$, що надає диференційне рівняння відносно u_C (помножуємо на «мінус одиницю»):

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0. \quad (4.27)$$

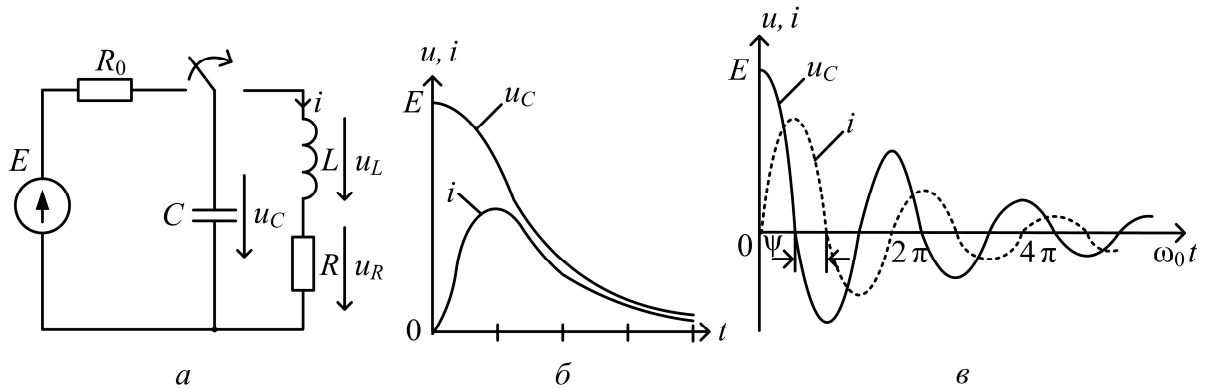


Рисунок 4.7

Його характеристичне рівняння:

$$LCP^2 + RCP + 1 = 0. \quad (4.28)$$

Звідки $p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$, а загальне розв'язання диференційного рівняння:

$$u_C = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (4.29)$$

Сталі інтегрування A_1 , A_2 знаходяться відповідно до початкових умов.

У залежності від того, як співвідносяться $\frac{R^2}{4L^2}$ і $\frac{1}{LC}$ можливі два варіанти перехідного процесу.

Аперіодичний процес $\left(\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC} \right)$ з коефіцієнтом загасання $\delta = \frac{R}{2L}$.

При цьому:

$$u_C = E(1 + \delta t)e^{-\delta t}; \quad (4.30)$$

$$i = \frac{E}{L} t e^{-\delta t}. \quad (4.31)$$

Протікання процесу в часі показано на рис. 4.7, б.

Періодичний процес $\left(\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC} \right)$ з власною кутовою частотою:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (4.32)$$

При цьому між напругою u_C й струмом i виникає кут фазного зсуву:

$$\psi = \arctg \frac{\omega_0}{\delta}, \quad (4.33)$$

а напруга й струм будуть такими:

$$u_C = \frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi), \quad (4.34)$$

де $\frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\delta t}$ – загасаюча амплітуда напруги;

$$i = \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t, \quad (4.35)$$

де $\frac{E}{\omega_0 L} e^{-\delta t}$ – загасаюча амплітуда струму.

Протікання процесу в часі показано на рис. 4.7, в.

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміють під «перехідним процесом» в електричному колі?
2. Сформулюйте і поясніть закони комутації?
3. Що таке усталені й вільні складові електричних струмів і напруг та як вони визначаються?
4. У чому полягають загальні принципи аналізу та розрахунку перехідних процесів?
5. Як складаються рівняння для розрахунку перехідних процесів?
6. Як визначаються початкові умови для напруг і струмів при розрахунках перехідних процесів?
7. Як визначаються сталі інтегрування у виразах перехідних струмів та напруг?
8. Який фізичний зміст мають сталі часу для електричних кіл і від чого вони залежать?
9. Як протікають перехідні процеси при підключенні котушки індуктивності до джерела з постійною ЕРС та при його відключенні з розрядом на резистор?
10. Як протікають перехідні процеси при підключенні конденсатора до джерела з постійною ЕРС та при його відключенні з розрядом на резистор?
11. Як протікають перехідні процеси при підключенні котушки індуктивності до джерела синусоїдної ЕРС?
12. Як протікає перехідний процес при розрядженні конденсатора на котушку індуктивності?

Розділ 5

МАГНІТНЕ ПОЛЕ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ

В основі роботи всіх електротехнічних пристроїв лежать або індуктивна, або силова, або обидві разом дії магнітного поля, яке являється в даному разі вирішальною складовою єдиного електромагнітного поля. Утворення і розподіл магнітного поля в електротехнічному пристрої визначаються його магнітним колом.

5.1. Магнітне коло

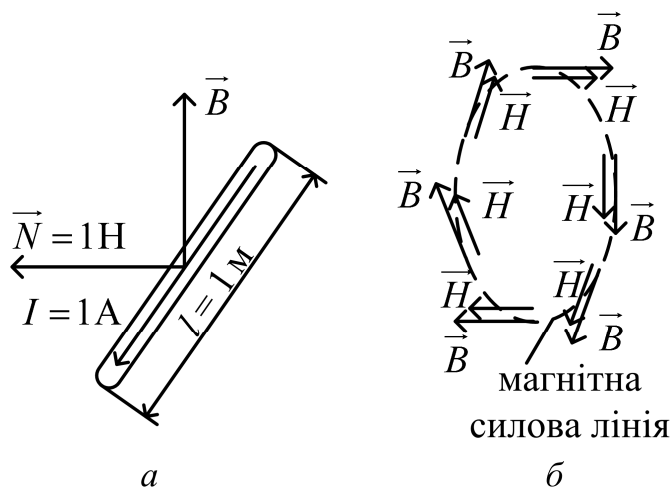


Рисунок 5.1

Магнітним колом називається сукупність замкнених шляхів проходження магнітних потоків в електротехнічних пристроях, яка характеризується параметрами: B (індукція), H (напруженість магнітного поля), Φ (магнітний потік), F (магніторушійна сила).

Індукція B проявляється як силова дія магніт-

ного поля на рухомі електричні заряди. Одиниця вимірювання *тесла* [Тл]. Якщо на провідник довжиною 1 м зі струмом 1 А діє сила 1 Н, то це означає, що він знаходиться в магнітному полі з індукцією 1 Тл, спрямованою перпендикулярно до площини, утвореною провідником і вектором сили (рис. 5.1, *a*). Магнітна силова лінія утворюється сукупністю дотичних до неї векторів магнітної індукції (рис. 5.1, *б*).

Напруженість магнітного поля H характеризує енергетичні витрати на його утворення. Вимірюється в [А/м]. Напруженість – величина векторна і в ізотропних середовищах співпадає за напрямом з вектором індукції (рис. 5.1, б). Числовий зв'язок між ними такий:

$$B = \mu_a H, \quad (5.1)$$

де $\mu_a = \mu_o \mu_r$ – абсолютна магнітна проникність; $\mu_o = 1,24 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна стала; μ_r – відносна магнітна проникність (для вакууму, повітря і т.п. $\mu_r = 1$; для феромагнітних матеріалів $\mu_r \gg 1$; останнє свідчить, що енергетичні витрати на утворення магнітного поля у феромагнітному середовищі будуть на кілька порядків меншими порівняно з енергетичними витратами в немагнітному середовищі, наприклад у повітрі).

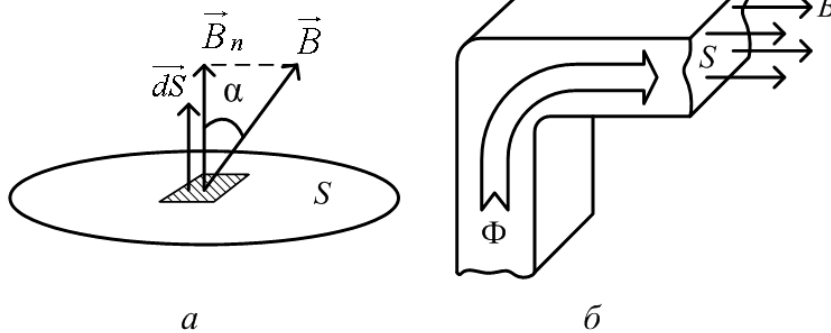


Рисунок 5.2

$$\Phi = \int_S \vec{B}_n d\vec{S} = \int_S B \cos \alpha dS. \quad (5.2)$$

Одиниця вимірювання *вебер* [Вб].

У найбільш простому випадку, що відповідає проходженню магнітного потоку в осердях електротехнічних пристроїв (рис. 5.2, б):

$$\Phi = B S, \quad (5.3)$$

де B – індукція в осерді, орієнтована перпендикулярно до його перерізу S .

Таким чином, $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

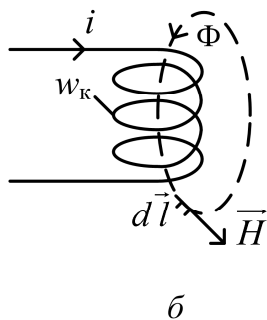
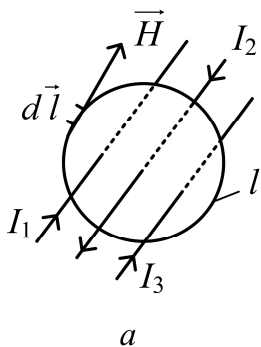
Перш ніж перейти до магніторушійної сили F , розглянемо **закон**

Магнітний потік Φ є інтегральною величиною від нормальної складової індукції до поверхні, крізь яку проходять магнітні силові лінії (рис. 5,2, а):

повного струму, який трактується таким чином – *лінійний інтеграл від вектора напруженості магнітного поля по будь-якому замкненому контуру дорівнює алгебраїчній сумі струмів, охоплених цим контуром.*

На рис. 5.3, а показано три струми, схоплені замкненим контуром l . Відповідно до закону повного струму можна записати:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I_1 - I_2 + I_3. \quad (5.4)$$



Якщо контур проходить крізь котушку, він охоплює всі витки котушки w_k і $\oint \vec{H} d\vec{l} = w_k i$ (рис. 5.3, б).

Це й буде МРС котушки:

$$F = w_k i, \quad (5.5)$$

яка утворює магнітний потік Φ .

Рисунок 5.3

5.2. Магнітні властивості матеріалів

В електротехніці усі матеріали поділяються на немагнітні і магнітні. У *немагнітних матеріалів* (пара- і діаманетики) відносна магнітна проникність $\mu_r \approx 1$. Це такі матеріали, як мідь, алюміній, ізолятори, повітря, вода та ін.

Магнітні матеріали (феромагнетики) мають відносну магнітну проникність $\mu_r \gg 1$. Це такі матеріали, як залізо, нікель, кобальт, сплави – сталь, чавун та ін.

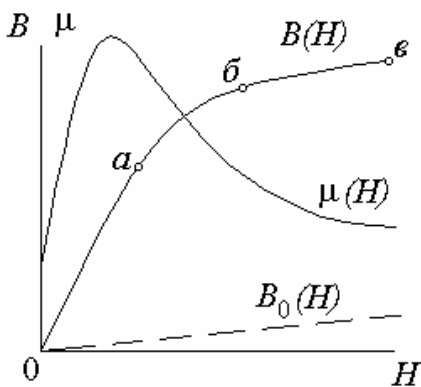


Рисунок 5.4

Особливістю феромагнітних матеріалів є те, що відносна магнітна проникність $\mu_r \neq \text{const}$, а вона залежить від інтенсивності магнітного поля.

Для феромагнетиків залежності індукції $B(H)$ і магнітної проникності $\mu(H)$ від напруженості магнітного поля нелінійні (рис. 5.4). Залежність $B(H)$ для феромагнетиків називається кривою намагнічування.

Як видно з кривої намагнічування збільшення напруженості магнітного поля H викликає крутий підйом магнітної індукції B на практично лінійній ділянці $0a$. Подальше збільшення напруженості H зовнішнього поля призведе до затриманого збільшення магнітної індукції (ділянка ab) і до насичення (ділянка bc).

Для немагнітних матеріалів залежність $B_0 = \mu_0 H$ – лінійна.

Для феромагнетиків характерний магнітний гістерезис – відставання в зміні їх магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля.

При циклічному перемагнічуванні, тобто при зміні напруженості від $+H$ до $-H$ утворюється петля гістерезису (рис. 5.5), на якій можна виділити характерні точки: B_r – залишкова магнітна індукція (при $H = 0$) та H_c – коерцитивна сила, що знімає намагніченість ($B = 0$).

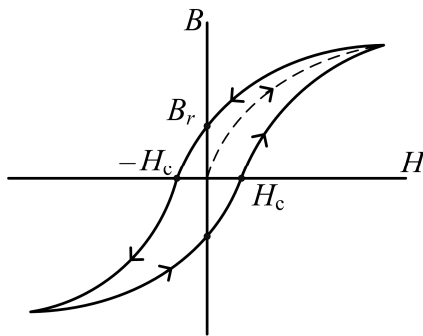


Рисунок 5.5

До *магнітом'яких матеріалів* відносяться технічне залізо, електротехнічні сталі, сплави залізонікель типу пермалой, чавуни. Ці матеріали використовуються для осердь електричного обладнання, наприклад, в електричних машинах, трансформаторах. З метою економії феромагнітних матеріалів електричні машини розраховуються таким чином, щоб при номінальному режимі роботи магнітна індукція їхнього магнітопроводу знаходилась між точками вигину кривої намагнічування a і b (рис. 5.4).

Магнітотверді матеріали мають широку петлю гістерезису і вони стійкі до розмагнічування. Це вуглеводисті, кобальтові, вольфрамові та хромисті сталі, а також сталі типу альніко, магніко та ін. Ці матеріали використовуються для постійних магнітів, систем запису інформації та ін.

Площа петлі гістерезису характеризує втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування.

Феромагнетики діляться на магнітом'які ($H_c < 100$ А/м) з вузькою петлею гістерезису (рис. 5.6, крива 1) та магнітотверді ($H_c > 20$ кА/м) з широкою петлею гістерезису (рис. 5.6, крива 2).

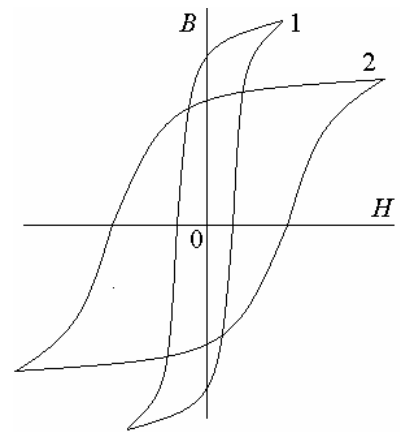


Рисунок 5.6

З'явилися кобальтосамарієві постійні магніти з великою залишковою індукцією B_r , які можуть утримувати вантаж, що перевищує їх власну масу в декілька сот раз.

Зазначимо, що магнітні властивості феромагнітних матеріалів погіршуються від механічних ударів та при збільшенні температури. При цьому постійні магніти розмагнічуються.

5.3. Закони, пов'язані з магнітними полями

5.3.1. Закон електромагнітної індукції

У 1831 р. М. Фарадей відкрив явище електромагнітної індукції:

Електромагнітною індукцією називають явище збудження ЕРС у контурі при змінненні магнітного потоку, зчепленого з ним. Індукована ЕРС дорівнює швидкості змінення потокозчеплення:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (5.6)$$

Знак «мінус» відображає правило Ленца:

Струм, створюваний у замкненому контурі індукованої ЕРС, завжди має такий напрям, що магнітний потік струму протидіє змінненню магнітного потоку зовнішнього поля, яке його спричинило.

Тобто при наближенні «північного» полюса постійного магніту (або електромагніту) до нерухомого металевого кільця або до замкненої котушки в них індукується струм такого напрямку, що створений ним магнітний потік своїм «північним» полюсом протидіє причині, що його викликала, а саме наближенню магнітного потоку іншої полярності.

Практично дуже важливим є змінення потокозчеплення внаслідок руху прямолінійних провідників в магнітному полі, або, навпаки, рух магнітного поля відносно нерухомих провідників, як це відбувається в електричних машинах.

Якщо провідник переміщується у постійному магнітному полі, то індукована ЕРС за законом електромагнітної індукції дорівнює:

$$E = B V l \sin \alpha, \quad (5.7)$$

де B – індукція магнітного поля; V – швидкість переміщення провідника;

l – активна довжина провідника; α – кут між напрямком силових ліній і напрямком переміщення провідника (рис. 5.7, а).

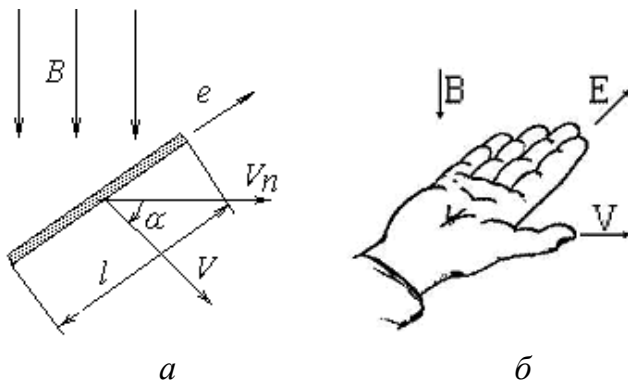


Рисунок 5.7

Напрямок і величина індукованої в провіднику ЕРС визначається за *правилом правої руки* (рис. 5.7, б): якщо праву руку розташувати так, щоб магнітні силові лінії входили в долоню, а відігнутий великий палець співпадав з напрямком руху провідника, то інші витягнуті

чотири пальці укажуть напрям індукованої ЕРС.

Відповідно,

$$E = B V l \text{ [В]}, \quad (5.8)$$

якщо B [Тл], V [м/с], l [м].

5.3.2. Закон Ампера

Силова дія магнітного поля на провідник зі струмом визначається законом Ампера, який лежить в основі розрахунків перетворення електричної енергії в механічну в електродвигунах. За законом Ампера, якщо провідник зі струмом I знаходиться у магнітному полі з індукцією B , то на провідник довжиною l діє електромагнітна (механічна) сила:

$$F = B I l \sin \alpha, \quad (5.9)$$

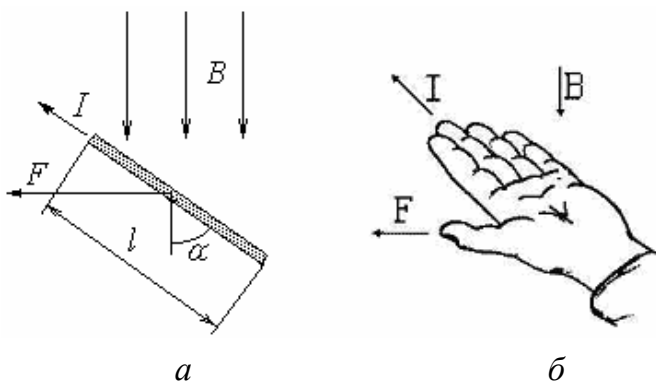


Рисунок 5.8

де α – кут між напрямком силових ліній і напрямком провідника (рис. 5.8, а).

Напрямок електромагнітної сили F завжди перпендикулярний до провідника зі струмом і магнітним силовим лініям. На практиці цей напрямок і величина

сили визначаються за *правилом лівої руки*: якщо ліву руку розташувати так, щоб магнітні силові лінії поля входили в долоню, а чотири витя-

гнуті пальці співпадали з напрямком струму в проводі, то відігнутий великий палець зазначить напрям сили, з якою магнітне поле діє на провід зі струмом (рис. 5.8, б).

Відповідно,

$$F = B I l \text{ [Н]}, \quad (5.10)$$

якщо B [Тл], I [А], l [м].

5.4. Класифікація магнітних кіл

Магнітне коло складається з однієї або декількох намагнічувальних котушок або постійних магнітів та магнітопроводу з магнітом'яких феромагнітних матеріалів необхідної конфігурації, утворюючих замкнені шляхи для силових ліній магнітного поля. Часто магнітопроводи включають в себе і невеликі повітряні зазори або зазори з немагнітного матеріалу. Феромагнітний магнітопровід концентрує і направляє силові лінії в місце, де безпосередньо використовується енергія магнітного поля, наприклад в повітряний зазор в електричних машинах, апаратах та приладах.

Магнітні кола поділяються на нерозгалужені та розгалужені, однорідні та неоднорідні. До однорідних відносяться кола, напруженість магнітного поля в яких по всій довжині магнітопроводу залишається незмінною. До неоднорідних відносяться магнітні кола, які мають по своїй довжині непостійну напруженість, що навіть при одному магнітному потоці обумовлюється різними площами поперечного перерізу та абсолютною магнітною проникністю окремих ділянок кола. Неоднорідними являються також магнітні кола, які мають поля розсіювання, наприклад, через нерівномірність розподілення витків котушки по довжині магнітопроводу.

На рис. 5.9 показані основні можливі варіанти магнітопроводів електротехнічних пристроїв без котушок намагнічування:

- однорідне, нерозгалужене (рис. 5.9, а), що найчастіше зустрічається в магнітних реакторах, однофазних трансформаторах;
- неоднорідне, нерозгалужене (рис. 5.9, б), найчастіше у вимірювальних приладах, мікромашинах;

- однорідне, розгалужене (рис. 5.9, в), найчастіше у трифазних трансформаторах;
- неоднорідне, розгалужене (рис. 5.9, г), найчастіше в електричних машинах.

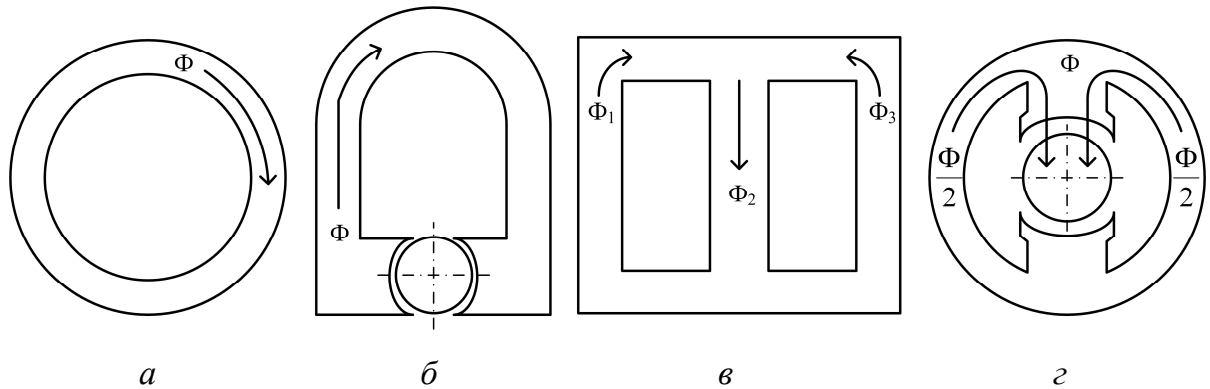


Рисунок 5.9

Магнітні кола з котушками намагнічування приведені на рис. 5.10.

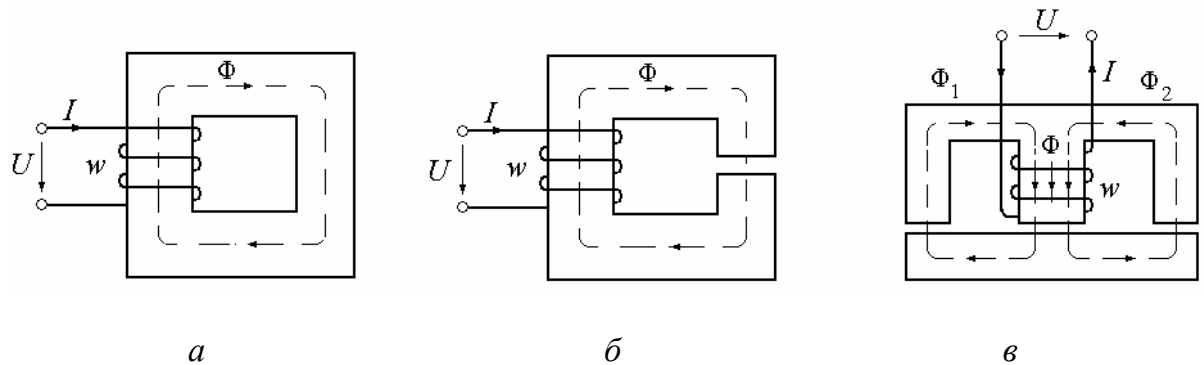


Рисунок 5.10

Показані однорідне нерозгалужене магнітне коло (рис. 5.10, а); неоднорідне нерозгалужене магнітне коло (рис. 5.10, б); неоднорідне розгалужене магнітне коло (рис. 5.10, в).

5.5. Аналогія між електричними і магнітними колами

В електричному колі носієм електричної енергії є струм, в магнітному колі – магнітний потік. ЕРС позначається вольтами, МРС – амперами.

Відповідно закон Ома для магнітних кіл трактується таким чином: *магнітна напруга на ділянці магнітного кола пропорційна величині магнітного потоку.*

Магнітна напруга U_M вимірюється в амперах і дорівнює:

$$U_M = R_M \Phi, \quad (5.11)$$

де R_M – магнітний опір ділянки магнітного кола.

З іншого боку, в однорідному магнітному полі:

$$U_M = \int_0^l \vec{H} d\vec{l} = H l. \quad (5.12)$$

Таким чином, $R_M \Phi = H l$, звідки

$$R_M = \frac{H l}{\Phi} = \frac{H}{B} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{l}{S}, \quad (5.13)$$

де l – довжина ділянки магнітного кола; S – площа її перерізу.

Порівнювання параметрів електричних і магнітних кіл наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Аналогія між електричними і магнітними колами

Електричні величини	Позначення і вираз		Магнітні величини	Позначення і вираз
Струм	I	-	Потік	Φ
ЕРС	E	-	МРС	$F = wI$
Опір	$R = \rho \frac{l}{S}$	-	Опір	$R_M = \frac{l}{\mu_a S}$
Напруга	$U = I \cdot R$	-	Напруга	$U_M = H_k l_k = \Phi \cdot R_{M_k}$
Питома провідність	$\gamma = \frac{1}{\rho}$	-	Магнітна проникність	μ_a

По аналогії між електричними та магнітними колами можна сформулювати закони Кірхгофа для магнітних кіл.

1-й закон (для вузла): Алгебраїчна сума магнітних потоків розгалуженого магнітного кола у вузлі дорівнює нулю:

$$\sum_k \Phi_k = 0. \quad (5.14)$$

Так для кола, зображеного на рис. 5.10, в, можна записати:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Цей закон витікає з безперервності силових магнітних ліній.

2-й закон (для контура): відповідно до вибраного напрямку обходу контура алгебраїчна сума МРС у контурі дорівнює алгебраїчній сумі магнітних напруг на ділянках контура.

Для нерозгалуженого магнітного кола 2-й закон Кірхгофа спрощується: МРС нерозгалуженого неоднорідного магнітного кола дорівнює арифметичній сумі падінь магнітних напруг на окремих її ділянках:

$$\sum_k U_{M_k} = \sum_k F_k. \quad (5.15)$$

Це впливає із закону повного струму.

5.6. Принцип розрахунку магнітних кіл постійного струму

Основною задачею розрахунку магнітного кола вважають пряму з наступним формулюванням.

Задано: потік магнітний потік Φ , розміри магнітопроводу, матеріал осердя, марка сталі, крива намагнічування $B(H)$.

Задача: Знайти $F = w I$ – МРС обмотки, необхідну для створення цього магнітного потоку Φ .

Послідовність розрахунку:

1) Коло розбивається на ділянки з таким розрахунком, щоб індукція і напруженість магнітного поля на протязі ділянки залишалась незмінною. За конструктивними розмірами магнітопроводу визначаються довжина l_k і площа поперечного перетину кожної ділянки S_k . Вважаємо, що потік Φ на кожній ділянці однаковий.

2) За заданим магнітним потоком Φ визначаємо індукцію на кожній ділянці $B_k = \frac{\Phi}{S_k}$.

3) Потім, знаючи індукцію B_k по кривій намагнічування визначаємо напруженість H_k для феромагнітних ділянок (рис. 5.11). Для немагнітних ділянок напруженість розраховуємо за формулою:

$$H_k = \frac{B_k}{\mu_0}.$$

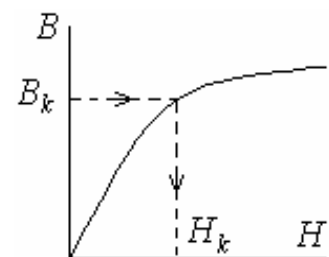


Рисунок 5.11

4) Знаючи H_k , за законом повного струму знаходимо МРС:

$$F = I \cdot w = \sum_{k=1}^n H_k l_k, \quad (5.16)$$

а потім знаходимо і струм $I = \frac{F}{w}$.

5.7. Енергія магнітного поля

Розглянемо, якою буде енергія магнітного поля при намагнічуванні осердя, охопленого котушкою (рис. 5.12). Намагнічування закінчиться, коли струм у котушці, підключений на напругу u , досягне якогось кінцевого значення I . Тобто відбудеться перехідний процес, що відповідає диференціальному рівнянню:

$$u = Ri + L \frac{di}{dt}, \quad (5.17)$$

де R – опір проводу котушки; L – індуктивність котушки.

Якщо праву і ліву частини рівняння помножити на струм i та проінтегрувати за часом, то отримуємо такий баланс енергії:

$$\int_0^{\infty} u i dt = \int_0^{\infty} R i^2 dt + \int_0^I L i di, \quad (5.18)$$

де $\int_0^{\infty} u i dt$ – електрична енергія; $\int_0^{\infty} R i^2 dt$ – теплова

енергія (нагрів проводу котушки); $\int_0^I L i di = \frac{LI^2}{2}$ – енергія магнітного поля, що зосереджена в осерді.

Пам'ятаючи, що $LI = \Psi = \Phi w$, а $wI = F$, визначаємо питому маг-

нітну енергію в осерді як $W_M = \frac{LI^2}{2S_{oc} l_{oc}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi}{S_{oc}} \cdot \frac{F}{l_{oc}} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_a}$.

Для немагнітного середовища (повітря, вакуум), в якому спостерігається індукція B , питома магнітна енергія $W_M = \frac{B^2}{2\mu_0} = 0,4B^2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$,

якщо B [Тл].

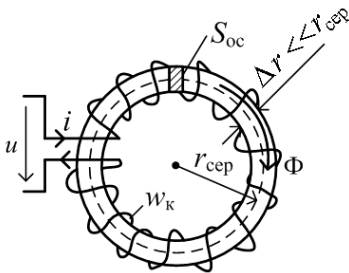


Рисунок 5.12

5.8. Силова дія магнітного поля

5.8.1. Правило лівої руки було представлено при розгляданні закону Ампера (рис. 5.8, б; формула (5.10)). Використовуючи це правило, завжди можна виявити силову дію магнітного поля на провідник зі струмом, якщо визначено магнітне поле, в якому знаходиться цей провідник. Наведемо приклад.

5.8.2. Силова взаємодія двох провідників зі струмом

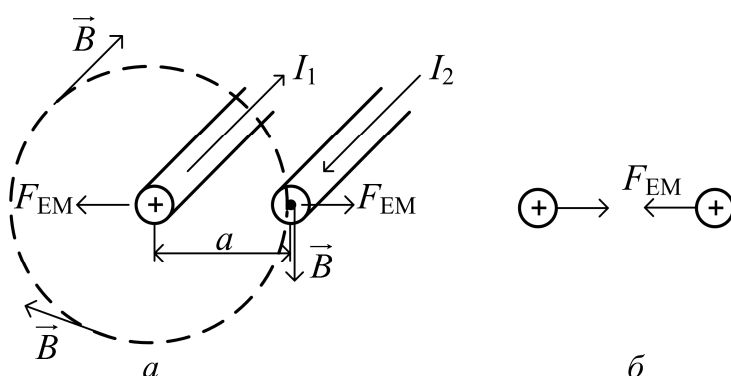


Рисунок 5.13

За законом повного струму напруженість магнітного поля від провідника зі струмом I_1 на відстані a , де розташований другий провідник, буде

$$H = \frac{I_1}{2\pi a} \quad (\text{рис. 5.13, а}),$$

чому відповідає індукція в повітрі $B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$.

За правилом лівої руки провідники будуть відштовхуватися (рис. 5.13, а), якщо напрям струму I_2 , буде зустрічним до струму I_1 , і притягуватися (рис. 5.13, б), якщо напрями будуть співпадати. Сила взаємодії провідників довжиною l буде такою:

$$F_{EM} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}. \quad (5.19)$$

5.8.3. Сила тяжіння магніту

Можна вважати, що тяжіння магніту (не має значення який це магніт: електричний чи постійний) починається при такому малому проміжку Δx , який не впливає на загальну МРС контура. Тобто індукція B вже не змінюється.

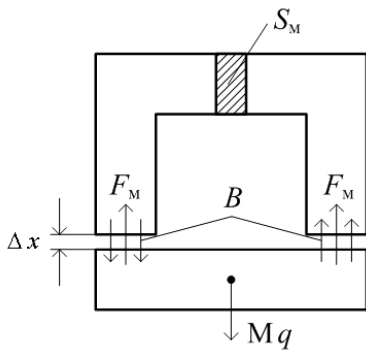


Рисунок 5.14

Тоді, у міру тяжіння ваги масою M (рис. 5.14), енергія магнітного поля в проміжку Δx переходить в роботу сил тяжіння F_M і буде їй дорівнювати:

$$2 F_M \Delta x = w_M \cdot 2 S_M \Delta x. \quad (5.20)$$

Звідси сила тяжіння магніту $F_M = 0,4 B^2 S_M 10^6$ [Н], якщо B [Тл], S_M [м²].

5.9. Індукційна дія магнітного поля

Правило правої руки, що спрямоване на визначення ЕРС, наведеної в провіднику при його відносному русі в магнітному полі, було представлено при розгляданні закону Фарадея (рис. 5.7, б, формула (5.8)).

Самоіндукція. Загальним є те, що при будь-якій зміні потокозчеплення в часі, в котушці, яка зчеплена з магнітним потоком Φ , наводиться

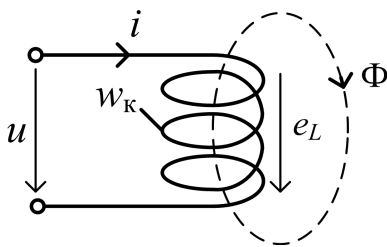


Рисунок 5.15

ЕРС $e = -\frac{d\psi}{dt}$, де $\psi = w_K \Phi$ – потокозчеплення котушки з числом витків w_K .

Якщо цей магнітний потік утворюється струмом, який проходить в котушці, то виникає

$$\text{ЕРС самоіндукції } e_L = -\frac{d\psi}{dt}.$$

Як вже відзначалось, потокозчеплення з котушкою від власного струму $\psi = Li$.

Таким чином,

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -w_K \frac{d\Phi}{dt},$$

де L – індуктивність котушки.

Відповідно до другого закону Кірхгофа для ідеальної котушки (рис. 5.15):

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = w_K \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.21)$$

Тобто можна вважати, що напруга, прикладена до котушки, іде на подолання ЕРС її самоіндукції.

Взаємоіндукція виникає при поточозчепленні котушки з магнітним потоком від іншої котушки, у якій проходить струм i_1 (рис. 5.16). Тобто $\psi_2 = w_2 \Phi = M_{21} i_1$, де w_2 – число витків котушки без струму, яка зчеплена

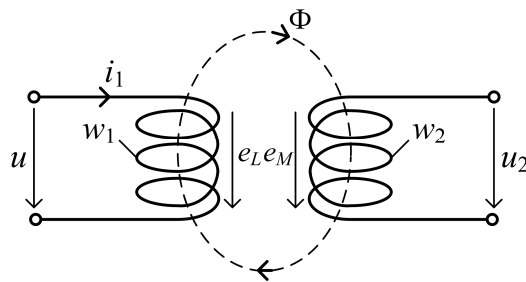


Рисунок 5.16

з магнітним потоком Φ , створеним іншою котушкою зі струмом i_1 ; M_{21} – взаємоіндуктивність, що характеризує вплив стороннього струму i_1 на поточозчеплення.

Відповідно до загального підходу ЕРС від взаємоіндукції буде дорівнювати

$$e_M = -\frac{d\psi_2}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt} = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

За другим законом Кірхгофа для другої котушки ($i_2 = 0$):

$$u_2 = -e_M = M_{21} \frac{di_1}{dt} = w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.22)$$

5.10. Котушка з осердям у колі змінного струму

Спочатку розглянемо ідеальну котушку з осердям, найближче до якої підходить тороїдна котушка (рис. 5.12), якщо не враховувати опір проводу (потоки розсіювання відсутні).

Цьому відповідає $u = -e_L = w_k \frac{d\Phi}{dt}$ (рис. 5.17, а). Якщо напруга синусоїдна $u = U_m \sin \omega t$, то магнітний потік також буде змінюватися за

законом синусоїди
$$\Phi = \frac{1}{w_k} \int u dt = \frac{1}{w_k} \int U_m \sin \omega t dt = \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

де
$$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega w_k}.$$

Також буде змінюватися і індукція $B = \frac{\Phi}{S_{oc}} = B_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$, яка ві-

дставатиме від напруги на кут $\frac{\pi}{2}$.

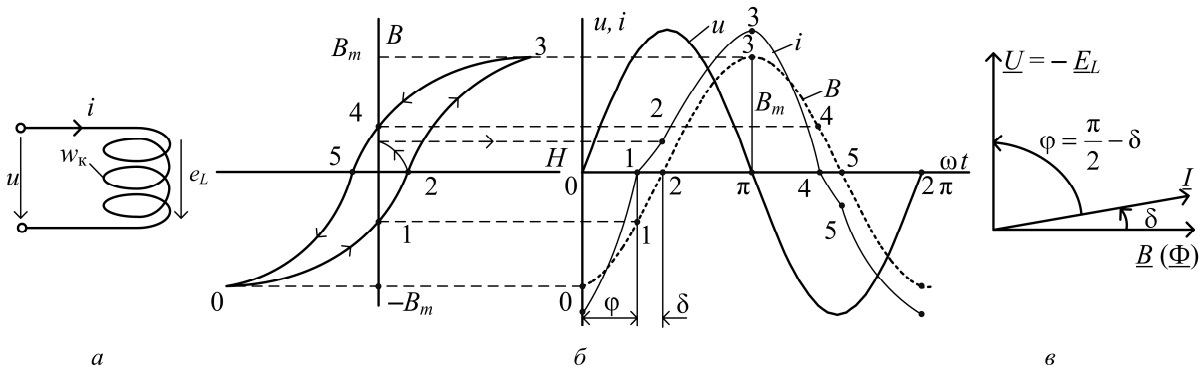


Рисунок 5.17

Враховуючи зазначений зв'язок між напругою u і індукцією B , переносимо характерні точки, що відповідають індукції на петлі гістерезису, на графік часової залежності B (рис. 5.17, б). Там же відкладаємо і значення струму, які відповідають напруженості магнітного поля $H = \frac{w_k i}{l_{oc}}$ в характерних точках. Виявляється, що в наслідок гістерезису індукція й струм зсунуті між собою на кут намагнічування δ , а напруга й струм на кут $\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta$. Це відображено і на векторній діаграмі (рис. 5.17, в).

У реальній котушці з осердям треба враховувати опір обмотувального проводу, а також наявність магнітних потоків розсіювання Φ_p , якщо осердя не тороїдне й обмотка охоплює його частково (рис. 5.18, а).

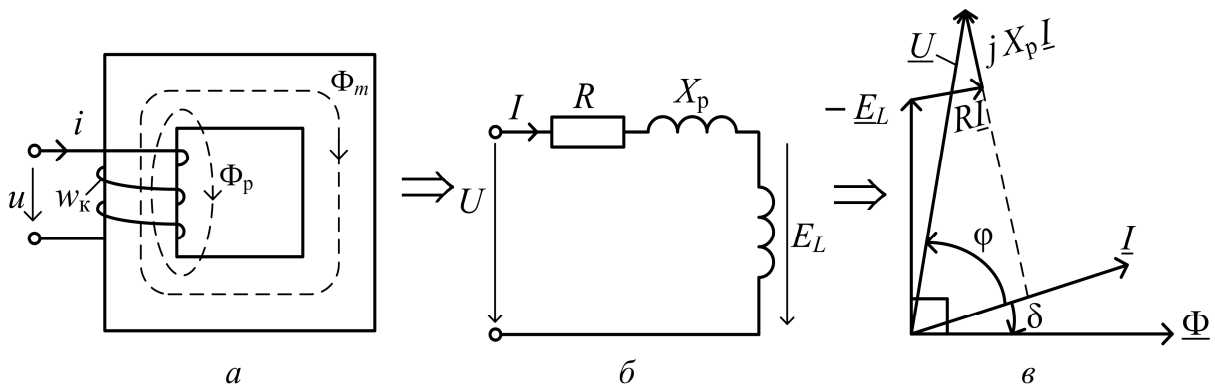


Рисунок 5.18

Напруга U витрачається не тільки на подолання ЕРС самоіндукції E_L , а і на подолання активного R і індуктивного X_p (від потоків роз-

сіювання) опорів (рис. 5.18, б):

$$\underline{U} = -\underline{E}_L + R\underline{I} + jX_p\underline{I}. \quad (5.23)$$

Все це відображено й на векторній діаграмі (рис. 5.18, в).

5.11. Втрати потужності в осерді котушки змінного струму

При змінюванні магнітного потоку в осерді виникають втрати потужності, пов'язані з перемагнічуванням (гістерезисні втрати) і наведенням короткозамкнених струмів (втрати від вихрових струмів).

Гістерезисні втрати пропорційні площині петлі гістерезису і можуть бути визначені як:

$$P_r = \sigma_r f B_m^n G, \quad (5.24)$$

де σ_r – гістерезисний коефіцієнт, який залежить від марки сталі (магнітних властивостей матеріалу); f – частота підведеної напруги; B_m – максимальне значення індукції; n – емпіричний коефіцієнт; G – маса осердя.

При $B > 1$ Тл, $n = 2$.

При протіканні змінного струму в обмотці наводиться ЕРС не тільки в обмотці, але і в осерді. Під дією ЕРС по осердю протікають струми, які називають вихровими (рис. 5.19, а). Ці вихрові струми, які протікають по осердю з відносно великим електричним опором, зумовлюють його нагрів і втрати потужності.

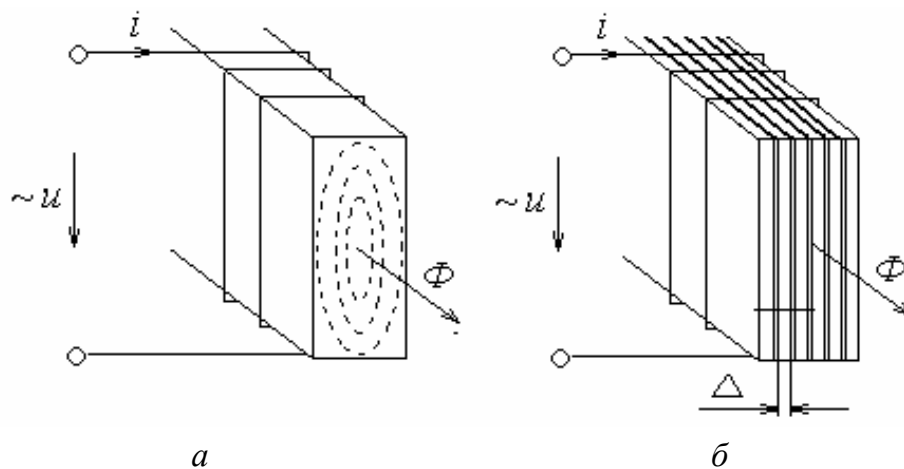


Рисунок 5.19

Для зменшення вихрових струмів і, відповідно, втрат в осерді, його виконують шихтованим, тобто набраним з окремих листів товщиною Δ , ізольованих один від одного (рис. 5.19, б). Таке осердя називають шихтованим.

Для розрахунку втрат на вихрові струми використовують вираз:

$$P_{\text{вс}} = \sigma_{\text{вс}} \cdot f^2 \cdot \Delta^2 \cdot B_m^2 \cdot G \cdot \gamma, \quad (5.25)$$

де $\sigma_{\text{вс}}$ – емпіричний коефіцієнт; $\gamma = 1/\rho$ – питома провідність матеріалу осердя.

Втрати в обмотці та в осерді намагаються звести до раціонального мінімуму, оскільки з їх збільшенням зменшується ККД пристрою. З цією метою осердя котушок в колах змінного струму виготовляються зі спеціальних легованих магнітом'яких електротехнічних сталей, які мають велику магнітну проникність. Таким чином зменшують втрати на гістерезис. Щоб зменшити втрати на вихрові струми осердя набирають з тонких, ізольованих один від одного лаком або окислом, листів сталі (товщиною 0,3–0,5 мм для машин і апаратів при частоті 50 Гц; товщиною 0,08 мм при частоті 400 Гц).

При високих частотах втрати на вихрові струми стають такими великими, що осердя втрачає сенс.

Запитання для самоконтролю

1. Яким чином створюється магнітне поле?
2. Якими величинами характеризується магнітне поле і як вони пов'язані одна з одною?
3. Яким чином пов'язані електричні і магнітні величини, що описують стан магнітних кіл?
4. Яким чином подаються магнітні властивості ферромагнітних і феромагнітних матеріалів?
5. Що називається магнітним колом?
6. Якими величинами характеризується стан магнітного кола?
7. Що розуміють під однорідним і неоднорідним, розгалуженим і нерозгалуженим магнітними колами?
8. Яку роль відіграють феромагнітні осердя у магнітних системах?
9. Як проявляється дія магнітного поля в електротехнічних пристроях?
10. Наведіть закон Ома та закони Кірхгофа для магнітних кіл.
11. Що розуміють під прямою та зворотною задачами розрахунку магнітних кіл?
12. Яка послідовність розрахунку магнітного кола з постійним магнітом?
13. Які фізичні процеси виникають у котушці зі сталевим осердям при живленні її змінним струмом?
14. Запишіть рівняння електричної рівноваги для кола котушки зі сталевим осердям, що живиться змінним струмом.
15. Побудуйте векторну діаграму напруг та струмів реальної котушки зі сталевим осердям.
16. Які втрати потужності характерні для котушки зі сталевим осердям, що живиться змінним струмом?

Розділ 6

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ

Електромагнітні пристрої складають надзвичайно широкий клас електротехнічних пристроїв різноманітного призначення. Це пристрої регулювання, електромагніти різного типу, комутаційні, пускорегульовальні та захисні апарати.

6.1. Дроселі

Дроселем називають котушку з феромагнітним осердям і змінною індуктивністю, яка вмикається у коло змінного струму послідовно з навантаженням для регулювання струму або напруги.

У порівнянні з регульовальним реостатом з великим активним опором R дроселі більш економічні, оскільки вони мають малий активний опір $R_{др}$, а відтак і малі втрати $R_{др}I^2$.

Повний опір дроселя:

$$Z_{др} = \frac{U_{др}}{I} = \sqrt{R_{др}^2 + X_{др}^2}, \quad (6.1)$$

де $U_{др}$, I – напруга і струм дроселя визначаються, в основному, індуктивним опором дроселя $X_{др} = \omega L_{др}$; $L_{др}$ – індуктивність дроселя з числом витків w , яка зворотно пропорційна його магнітному опору.

Розрізняють дроселі з регульованим повітряним проміжком та дроселі насичення.

6.1.1. Дросель з регульованим повітряним проміжком

У дроселі з регульованим повітряним проміжком δ (рис. 6.1, *a*) магнітне коло складається з двох ділянок – сталюого осердя з малим магніт-

ним опором $R_{\text{мст}}$ і повітряного проміжку з великим магнітним опором $R_{\text{м0}}$. Повний магнітний опір:

$$R_{\text{м}} = R_{\text{мст}} + R_{\text{м0}} \approx R_{\text{м0}} = \frac{2\delta}{\mu_0 S}. \quad (6.2)$$

Оскільки індуктивність $L = \frac{\Psi}{i} = \frac{w\Phi}{i}$, а магнітний потік $\Phi = \frac{F}{R_{\text{м}}} = \frac{i \cdot w}{R_{\text{м}}}$, то

$$L = \frac{w^2}{R_{\text{м}}}. \quad (6.3)$$

Враховуючі (6.2) індуктивність дроселя можна записати як:

$$L_{\text{др}} \approx \frac{\mu_0 \cdot S \cdot w^2}{2\delta}, \quad (6.4)$$

де S – площа поперечного перерізу осердя, а його індуктивний опір:

$$X_{\text{др}} = \omega \cdot L_{\text{др}} \approx \frac{\mu_0 w^2 S \cdot \omega}{2\delta}, \quad (6.5)$$

тобто $X_{\text{др}} \sim \frac{1}{\delta}$ – зворотно пропорційний повітряному проміжку.

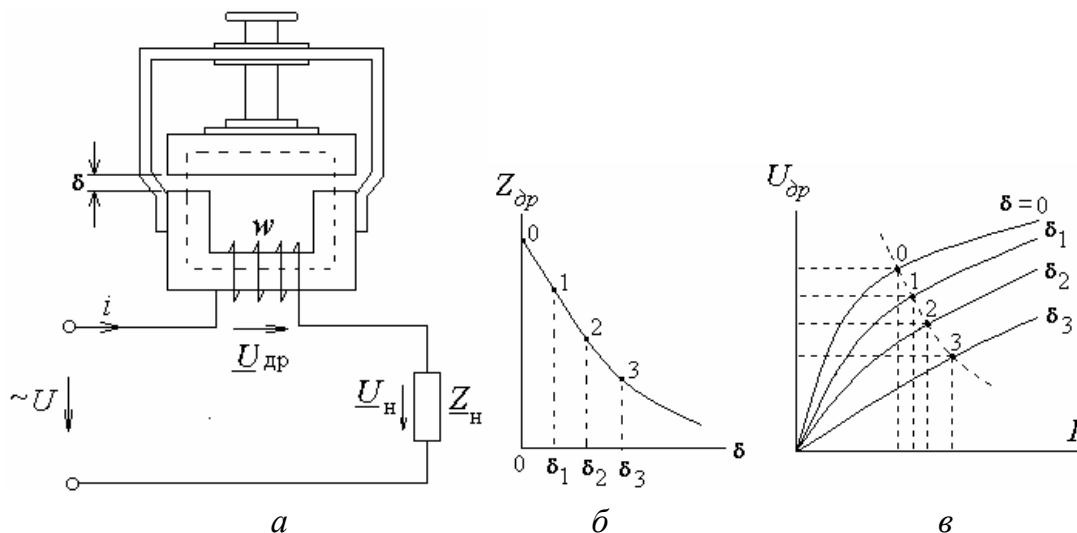


Рисунок 6.1

При збільшенні повітряного проміжку δ і незмінній напрузі $U = \text{const}$ струм I у колі і напруга на навантаженні $U_H = I Z_H$ збільшуються внаслідок зменшення $Z_{др}$, а напруга на котушці дроселя $U_{др} = I Z_{др}$ зменшується (рис. 6.1, б, в):

$$U_{др} = U - U_H = U - Z_H I. \quad (6.6)$$

Залежність $U_{др}(I)$ називають *вольт-амперною характеристикою* дроселя (рис. 6.1, в). Ці дроселі застосовують для змінення струму навантаження у зварювальних трансформаторах та електропечах змінного струму. Їх основна вада – складність конструкції пристрою регулювання повітряного проміжку.

6.1.2. Дроселі насичення

Дросель насичення являє собою котушку із замкненим осердям з магнітом'якої сталі, індуктивність якої легко регулюється через змінення постійного струму $I_{кер}$ у додатковій обмотці керування (рис. 6.2, а).

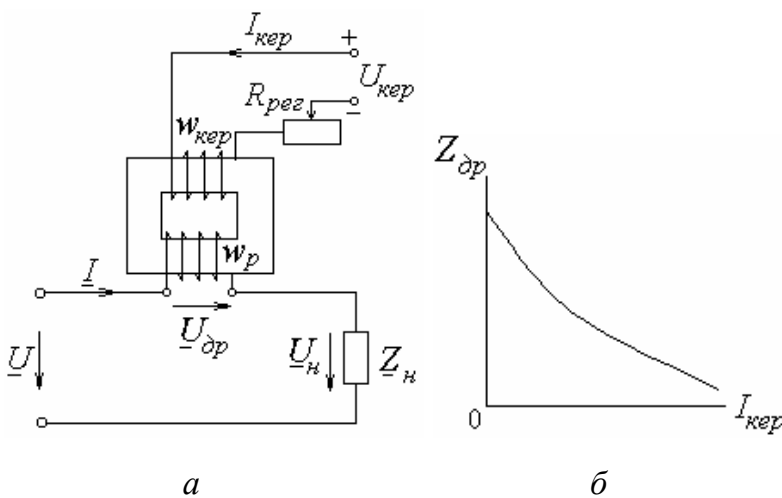


Рисунок 6.2

Змінення $I_{кер}$ за допомогою регулювального реостата змінює ступінь насичення осердя, тобто його абсолютну магнітну проникність μ_a (зменшується зі збільшенням струму $I_{кер}$), від значення якої залежить індуктивність дроселя:

$$L_{др} = w^2 \frac{\mu_a S}{l}, \quad (6.7)$$

де l – довжина середньої лінії магнітопроводу.

Дроселі насичення проектують так, що за відсутності струму керування ($I_{кер} = 0$) у колі змінного струму працюють при ненасиченому осерді. При цьому індуктивність дроселя $L_{др}$ і його індуктивний опір $X_{др}$ мак-

симальні, а робочий струм I – мінімальний. Зі збільшенням струму керування $I_{\text{кер}}$ опір дроселя буде зменшуватися (рис. 6.2, б), а значить струму дроселя I буде зростати. Принцип регулювання струму дроселя I за допомогою струму керування $I_{\text{кер}}$ можна пояснити наступною схемою:

$$I_{\text{кер}} \uparrow \Rightarrow \mu_a \downarrow \Rightarrow L_{\text{др}} \downarrow \Rightarrow X_{\text{др}} = \omega L_{\text{др}} \downarrow \Rightarrow Z_{\text{др}} \downarrow \Rightarrow I \uparrow.$$

Дроселі насичення з регульованим нелінійним опором $Z_{\text{др}}$, хоча і знижують $\cos\phi$ пристрою, широко застосовуються для регулювання струму у навантаженні дугової електрозварки, електропечей, освітлювальних пристроїв та ін.

Дроселі насичення виготовляють на потужність від 0,1 ВА до десятків кВА. Їх потужність може співпадати з потужністю пристрою, в якому вони використовуються. Їх переваги: відсутність рухомих частин, простота конструкції, надійність у роботі і високий ККД у колах регулювання робочого струму.

6.2. Електромагніти силові

Здатність електромагнітів, як і постійних магнітів, притягувати до своїх полюсів близько розташовані феромагнітні тіла основана на електромеханічній взаємодії магнітного поля електромагніта з мікрострумами у феромагнітному тілі. При цьому феромагнітне тіло, що притягується, само намагнічується, його полярність – протилежна до полярності полюсів електромагніта.

Якщо в обмотці електромагніту змінити напрям струму, то напрям магнітного потоку в осерді і його полярність зміняться, одночасно поміняються місцями й полюси феромагнітного тіла. Тому електромагніти можуть працювати і на постійному, і на змінному струмі.

Принцип дії і величина силової взаємодії електромагніту розглянута і визначена раніше (5.20).

Тягові електромагніти з лінійним (зворотно-поступальним) рухом якоря (рис. 6.3, а) застосовують для керування гідравлічними або пневматичними вентилями, кранами, виконавчими органами станків та механізмів.

Принципова конструктивна схема вантажопідйомного електромагніту показана на рис. 6.3, б, де 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – яр. F – сила тяжіння, Φ – магнітний потік, δ – повітряний зазор.

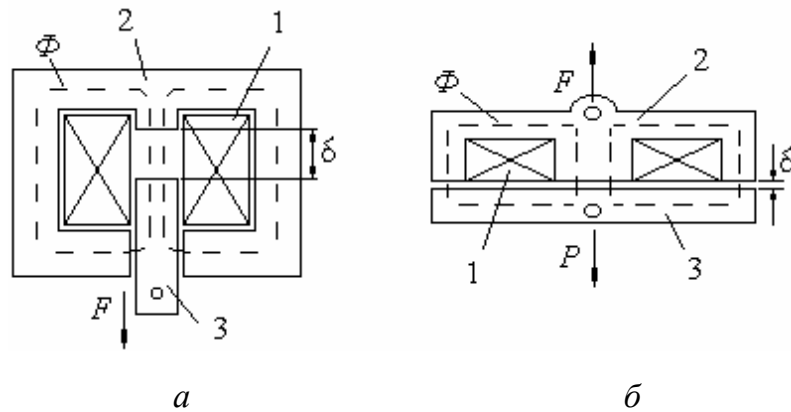


Рисунок 6.3

У промисловості електромагніти знайшли широке застосування, наприклад в підйомних кранах, в якості приводів гальм, муфт зчеплення, вентилів у трубопроводах для рідин, в комутаційній апаратурі електроустаткування, у вимірювальних приладах, в автоматах, реле та ін.

На рис. 6.4 показані конструктивні виконання електромагнітів змінного та постійного струму різноманітного призначення, що застосовуються у промисловості.



Рисунок 6.4

На рис. 6.4, а показаний електромагніт тягнучої та штовхаючої дії, на рис. 6.4, б – промисловий і на рис. 6.4, в – вантажопідйомний.

6.3. Комутаційні, пускорегулювальні та захисні апарати

Керування електроприводами здійснюється за допомогою спеціальної електричної апаратури.

Апаратура керування низької напруги (НН) (до 1000 В) за призначенням ділиться на три групи:

- *комутаційну*, замикаючу головне коло двигуна, яка включається послідовно з навантаженням (рубильники, контролери, пускачі, повітряні автомати тощо);
- *пускорегулювальну*, здійснюючу обмеження пускових струмів, регулювання частоти обертання і гальмування двигуна (пускові та регулювальні реостати, дроселі, резистори з постійним опором тощо);
- *захисну*, яка захищає електродвигун та його мережу живлення від струмів короткого замикання, перевантажень, зниження напруги (плавкі запобіжники, теплові і температурні реле, реле максимального струму, розчіплювачі повітряних автоматів, реле мінімальної напруги тощо).

Контакти виконують з міді або латуні.

При відключенні навантаження відбувається розрив струму у навантаженні. У колі з індуктивністю при цьому виникає ЕРС самоіндукції. Під дією цієї ЕРС та напруги кола у проміжку між контактами відбувається іонізація повітря і виникає електрична дуга, що спричиняє руйнування, зварювання контактів тощо. Для запобігання цьому використовують дугогасильні камери – ізольовані мідні пластини.

Розглянемо найпоширеніші комутаційні, пускорегулювальні та захисні апарати.

6.3.1. Контактори

Контактор – двопозиційний апарат, призначений для частих вмикань та вимикань електродвигунів та інших силових кіл змінного струму з напругою до 660 В і кіл постійного струму з напругою до 440 В. По суті контактор – це вмикач з електромагнітним керуванням. Його головні (лінійні) контакти, які вмикаються послідовно у силове коло, замикаються силою тяги електромагніта зі струмом у допоміжному (оперативному) колі.

Схема та зовнішній вигляд контактора серії МК подано на рис. 6.5. Контактор керується дистанційно за допомогою кнопкового пускача. Якщо замкнути коло паралельно ввімкнутій у коло котушки 2 електромагніта 1 (натисканням кнопки «Пуск»), то сталевий якір 3 притягнеться до осердя і замкнуться головні контакти 4, 5 (рис. 6.5, а). В результаті че-

рез гнучкий провідник 6 замкнеться силове коло зі струмом I у навантаженні, наприклад електродвигун з джерелом живлення. Одночасно перемикаються блокувальні контакти 7 і 8, і замикальні контакти 7 шунтують пускову кнопку. Відключення з поверненням його у вихідне положення під дією

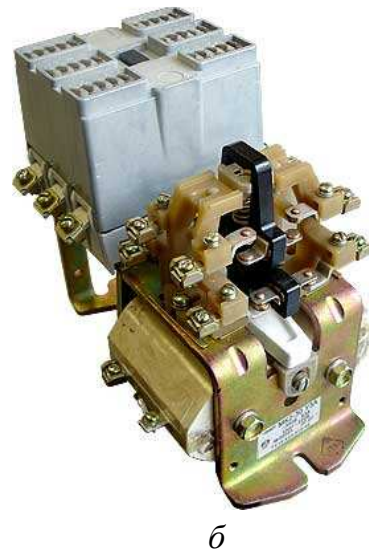
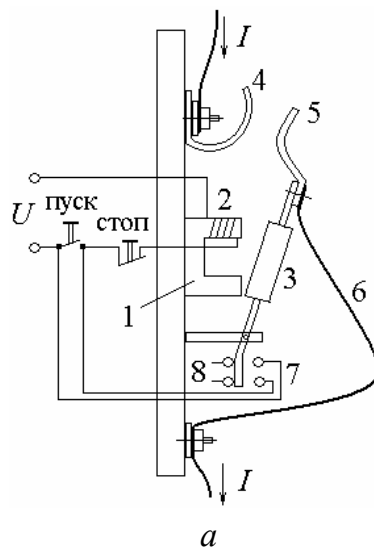


Рисунок 6.5

власної маси і зворотної пружини (при її наявності) здійснюється через розрив кола струму в котушці 2 (натисканням кнопки «Стоп»).

Контактори допускають велике число включень (до 1200 на годину), зносостійкість їх головних контактів доходить до декількох мільйонів включень та відключень. Повернення якоря контактора при зниженні або зникненні напруги на котушці забезпечує автоматичний захист електроустановки від зниження напруги та самозапуску двигуна після його зупинки. Від струмів короткого замикання і перевантажень контактор не захищає.

Час включення контакторів на постійному струмі: (0,1–0,4) с, а на змінному струмі (0,05–0,07) с. Час відключення приблизно у два рази менший.

6.3.2. Реле захисні

Електричним реле називають апарат, призначений для автоматичного спрацьовування (включення або відключення) при зміні якогось електричного параметра кола (струму, напруги тощо) або неелектричного параметра, на який він має реагувати.

Реле захисту і керування – апарати багаторазової дії і виконуються вони із самоповерненням або з ручним поверненням.

Основні характеристики реле: значення величини спрацьовування і відпускання (повернення), коефіцієнт повернення і час спрацьовування.

Коефіцієнт повернення – відношення величин відпускання і спрацьовування (завжди менше одиниці).

Час спрацьовування реле (або витримка реле) $t_{сп}$ – час подачі сигналу на вхід реле до моменту його включення.

Відрізняють безінерційні ($t_{сп} < 1$ мс), швидкодіючі ($t_{сп} < 50$ мс) і нормальні ($t_{сп} < 0,05-0,2$ с).

Реле максимального струму широко застосовується в електроустановках для автоматичного захисту від КЗ (рис. 6.6). Якщо робочий струм I перевищує певне максимальне значення, то сила тяги електромагніта, що включає обмотку 1 та сталеве осердя 2, перевищує механічну силу пружини 4, забезпечуючи переміщення якоря 3. При цьому замикаються контакти замикальні 5, а контакти розмикальні 6 – розмикаються.

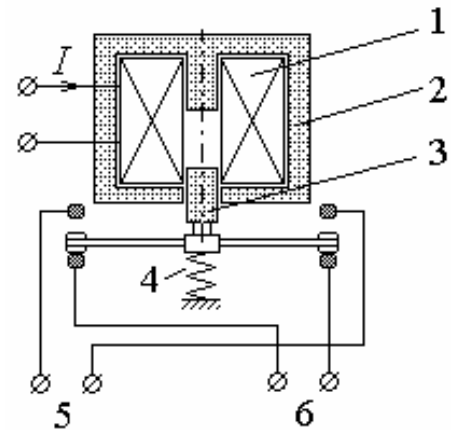


Рисунок 6.6

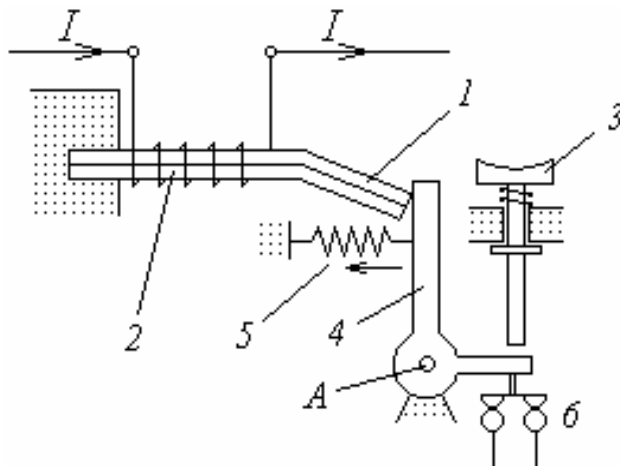


Рисунок 6.7

Теплове реле призначено для захисту електроапаратури від тривалих перевантажень (рис. 6.7). При нагріві біметалічна пластина 1 у спеціальному нагрівачу 2 (ніхромова проволочка) деформується, її зігнутий кінець піднімається і вивільняє важіль 4 при спрацьовуванні. Важіль 4 обертається пружиною 5 вліво відносно осі А і своїм кінцем розмикає нормально замкнені контакти 6 кола керування двигуна.

Після охолодження пластини протягом 3–5 хв вихідний стан реле може бути відновлений натисканням на кнопку повернення 3.

Реле відрізняються різноманітним конструктивним виконанням у залежності від функціонального призначення. На рис. 6.8 показані реле максимального струму серії РЕВ570, теплове реле РТТ–141 та реле максимального струму з самоповерненням РЕМ65. Реле максимального струму серії РЕВ570 (рис. 6.8, а) застосовується в якості реле максимального струму в основному для захисту електродвигунів постійного струму від струмів КЗ. Його котушки виконуються на номінальні струми від 1,6 до 1250 А.

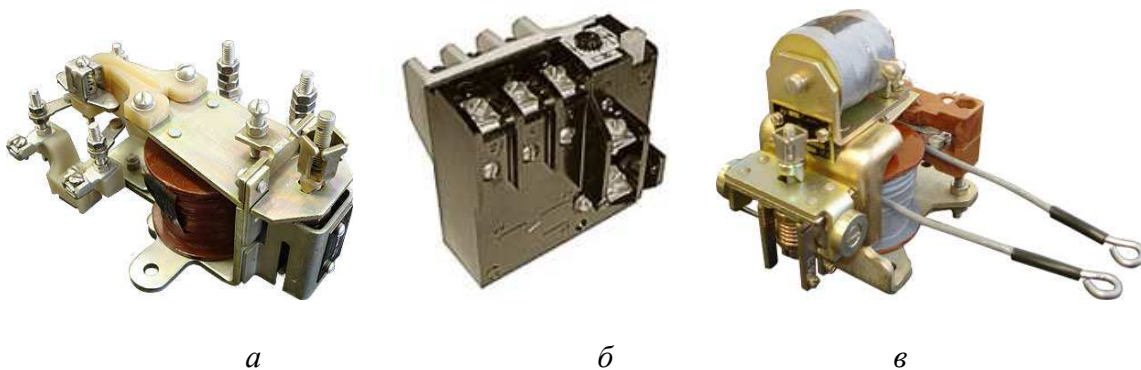


Рисунок 6.8

Реле теплове РТТ–141 (рис. 6.8, б) призначено для захисту трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором від перевантажень неприпустимої тривалості та від струмів, які виникають при обриву однієї з фаз.

Реле максимального струму з самоповерненням РЕМ65 (рис. 6.8, в) призначено для комутації кіл в схемах автоматичного керування електроприводами постійного струму напругою до 320 В судового електрообладнання. Це реле виконується з самоповерненням з котушкою, що втягує, на номінальні струми від 2,5 до 100 А.

6.3.3. Повітряні автоматичні вимикачі

Повітряний автоматичний вимикач (автомат) – це комплектний комутаційний апарат багаторазової дії, який складається з силових контактів з дугогасильним пристроєм, механізму вільного розчеплення, елементів захисту – розчіплювачів та привода. В електричних колах вони виконують функції рубильника та запобіжника, а повітряними називаються тому, що гасіння дуги відбувається у повітряному середовищі.

Автомати широко застосовуються для керування і захисту від перевантажень, КЗ, замикань на землю та при втраті або зниженні напруги різних силових кіл змінного і постійного струму напругою до 1000 В з рідким вмиканням (до шести раз на годину). Відключаються автомати автоматично при спрацюванні розчіплювачів, а в нормальних режимах – вручну або дистанційно кнопкою.

Розчіплювачі можуть бути електромагнітними, тепловими максимального струму та незалежними.

Електромагнітний розчіплювач – це електромагнітне реле соленоїдного типу, яке діє на механізм відключення силових контактів автомата. Розчіплювачі максимального струму захищають коло від струмів КЗ та перевантажень, а мінімальної напруги – від зниження напруги.

Тепловий розчіплювач складається з теплового реле з біметалевою пластиною і механізму відключення. Через теплову інерцію реле діє повільно (з витримкою часу) і захищає коло тільки від тривалих перевантажень.

Найбільш розповсюдженими є автомати з *електромагнітним* розчіплювачем максимального струму (рис. 6.9, а). Якщо струм I в навантаженні перевищує допустиме значення, то котушка 1 втягує в себе осердя 2, яке ударником 3 вибиває клямку 4 із зачеплення з зубом важеля 5. Рухомий контакт автомата 6 визволяється та під дією зворотної пружини 7 швидко відключається, силове коло розриваючи майже миттєво.

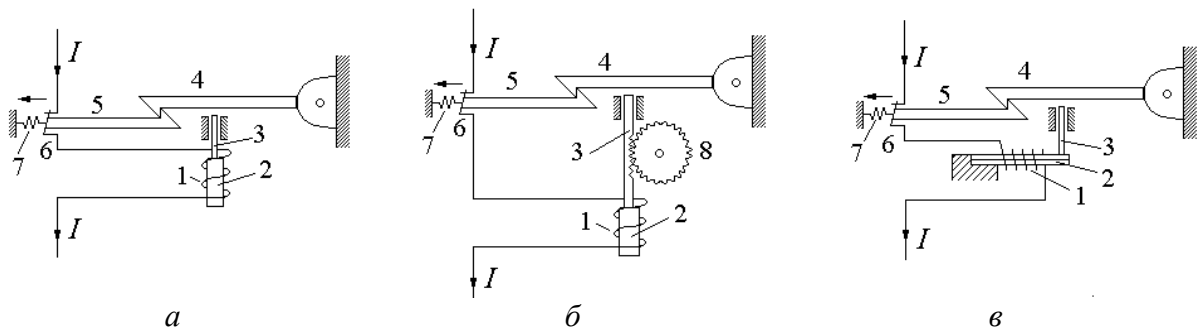


Рисунок 6.9

Для утворення витримки часу встановлюють електромагнітні розчіплювачі максимального струму з повітряним, масляним або годинниковим (зубчатим) механізмом 8 (рис. 6.9, б), який гальмує переміщення ударника 3 при струмах спрацювання на заданий час.

В автоматі з тепловим розчіплювачем (рис. 6.9, в) ударник 3 діє на клямку 4 механізму. Його приводить у дію біметалева пластина 2. Нагрівальний елемент теплового реле 1 вмикається в коло навантаження послідовно. Через теплову інерцію пластини теплові розчіплювачі відмикають коло з витримкою часу, яка знаходиться у зворотній (гіперболічній) залежності від струму перенавантаження.

У залежності від призначення та типу розчіплювачів розрізняють універсальні, установочні та швидкодіючі апарати. Найбільш простими є установочні апарати. Універсальні автомати мають комбінований захист – укомплектовані електронними або електромагнітними розчіплювачами максимального струму і мінімальної напруги. Установочні автомати промислового або побутового призначення випускаються одно- та триполюсними з ручним приводом, звичайно з нерегульованим максимально-струмовим, тепловим або комбінованим захистом у закритому або захищеному виконанні на номінальні струми 6–600 А та напруги до 660 В. На рис. 6.10 поданий загальний вигляд установочних автоматів серій А 3700 (а), ВА-СЕЩ (б) та ВА57-39 (в).

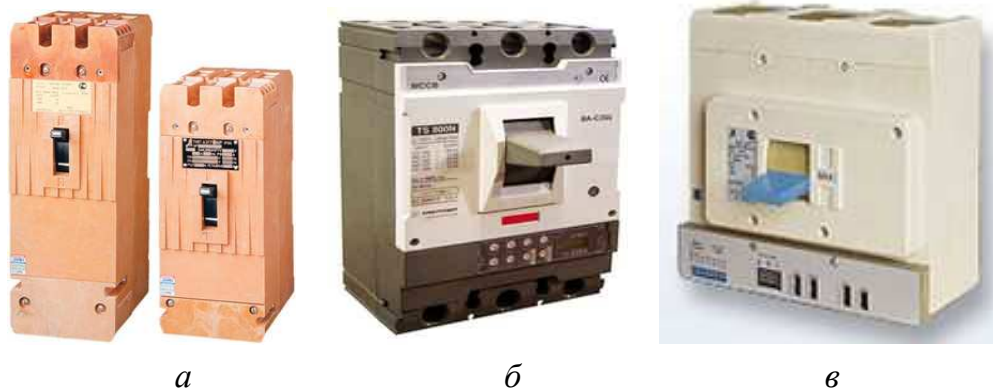


Рисунок 6.10

Запитання для самоконтролю

1. Що називається дроселем і з яких елементів він складається?
2. Яка класифікація дроселів і їх призначення?
3. Що називається контактором і з яких елементів він складається?
4. Призначення контакторів?
5. Що називається захисним реле?
6. Назвіть види захисних реле і їх призначення?
7. Що називається повітряним автоматичним вимикачем?
8. Назвіть типи автоматичних вимикачем?

Розділ 7

ТРАНСФОРМАТОРИ

Трансформатором називається електротехнічний пристрій, призначений для передачі електричної енергії змінного струму шляхом взаємодуктивності, найчастіше зі зміною напруги. Частота залишається незмінною.

На рис. 7.1 показані умовні позначення однофазних трансформаторів.

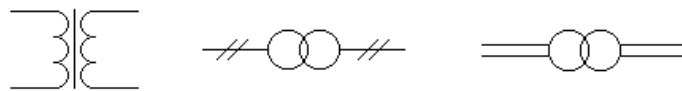


Рисунок 7.1

7.1. Види трансформаторів

Розрізняють:

Енергетичні трансформатори, що використовуються в електроенергетичних мережах. Частина з них призначена для підвищення напруги на виході з електростанцій з метою зменшення втрат у лініях електропередачі, які зворотнопропорційні до напруги у квадраті. Вважається, що передача електричної енергії буде достатньо ефективною, якщо на 1 км лінії буде припадати 1–2 кВ напруги.

Велика кількість енергетичних трансформаторів призначена для пониження високої напруги ліній електропередач у місцях споживання до рівня, прийнятого на виробництві й у побуті. Трифазна схема передачі електроенергії від електростанції до споживачів показана на рис. 7.2

Технологічні трансформатори, що використовуються як технологічне обладнання. Найбільш поширені серед них – зварювальні трансформатори.

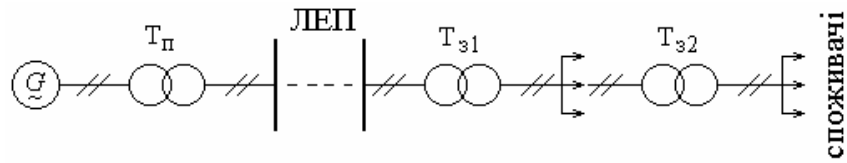


Рисунок 7.2

Вимірвальні трансформатори, що використовуються для безконтактного вимірювання напруг й струмів у лініях електропередач.

Автотрансформатори, що дозволяють при необхідності змінювати напругу на виході.

Імпульсні трансформатори, що використовуються для передачі різного виду сигналів.

Система охолодження трансформаторів може бути природною та штучною. Тому вони поділяються на сухі та масляні.

Сухі трансформатори охолоджуються навколишнім повітрям (рис. 7.3, а). Їх виготовляють на потужності до 2500 кВА.

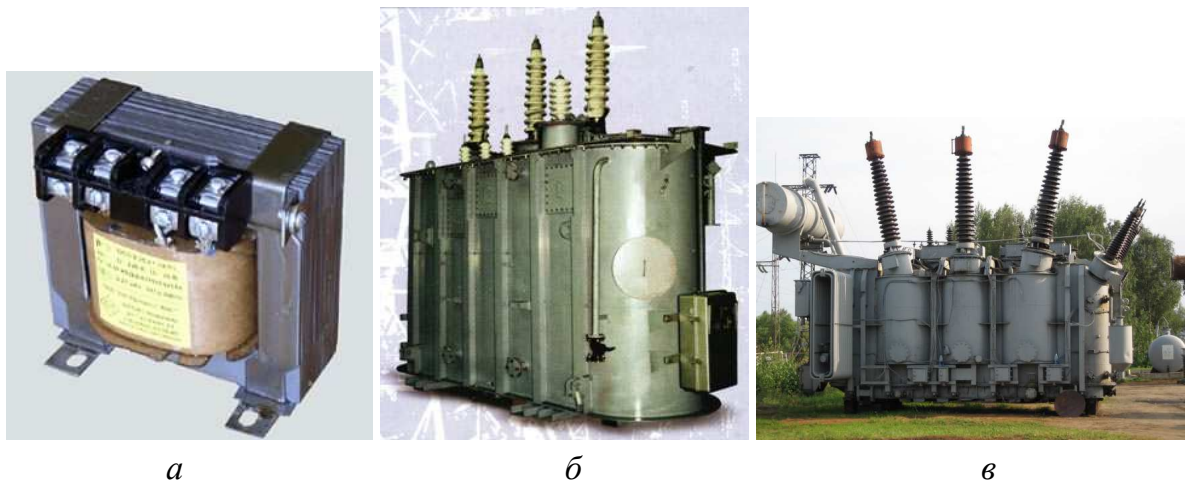


Рисунок 7.3

У масляних трансформаторах передача теплоти від обмоток та магнітопроводу крізь стінки бака назовні в навколишнє середовище здійснюється за допомогою мінерального трансформаторного масла, яке у порівнянні з повітрям має значно більшу теплопровідність. Крім того, це масло відіграє роль додаткового ізолятора. В трансформаторах невеликої потужності бак має гладкі або ребристі стінки (рис. 7.3, б), вищої потужності – трубчаті з вертикальними трубами, а в більш потужних – з навісними радіаторами (рис. 7.3, в).

У ряді масляних трансформаторів здійснюється природна циркуляція масла: нагріте трансформаторне масло з меншою щільністю піднімається вгору, поступає в труби, охолоджується в них і опускається донизу. В трансформаторах потужністю 6,3–63 МВА додатково до природного здійснюється форсоване повітряне охолодження навісних трубчатих радіаторів і стінок бака за допомогою вентиляторів, вбудованих в радіатори. В трансформаторах великої потужності застосовується примусова циркуляція масла за допомогою насосів та його охолодження в спеціальних охолоджувачах, встановлених безпосередньо на баці трансформатора та інтенсивно вентиляторами, що обдувають.

Незважаючи на різне функціональне призначення, принцип дії і конструктивна основа всіх цих трансформаторів однакові, а також однакові основні співвідношення й характеристики, які розглянемо на прикладі однофазного трансформатора.

7.2. Будова і принцип дії однофазного трансформатора

Розглянемо однофазний силовий трансформатор. Він складається з двох головних частин: обмоток і магнітної системи – замкненого сталевого магнітопроводу.

Обмотки – первинна з числом витків w_1 , яка з'єднана з джерелом змінного струму, і вторинна з числом витків w_2 , до якої вмикають навантаження, виготовляються як правило з ізольованого мідного проводу. Виводи однофазного силового трансформатора (рис. 7.4) позначаються так: обмотка вищої напруги (ВН) – прописними літерами А-Х, обмотка нижчої напруги (НН) напруги – рядковими літерами а-х.

Магнітопровід трансформатора збирається із штампованих прямокутних листів електротехнічної сталі товщиною 0,25 та 0,5 мм, що забезпечує зменшення втрат на гістерезис та вихрові струми. Конструктивно магнітопроводи поділяються на стрижневі та броньові. Відповідно і трансформатори називаються стрижневими та броньовими.

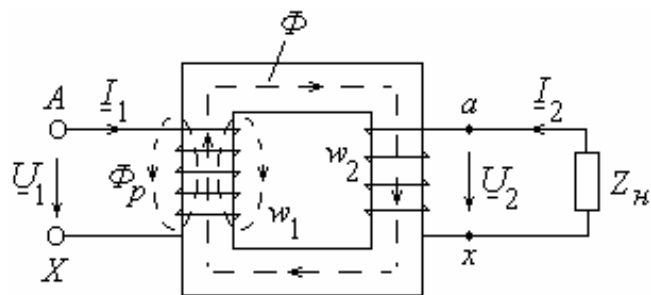


Рисунок 7.4

У однофазному стрижневому трансформаторі (рис. 7.5, *a*) осердя складається з двох вертикальних стрижнів, на яких розташовуються обмотки, та двох горизонтальних (нижнього та верхнього) ярем того ж поперечного перетину. На кожному з стрижнів розташовують концентрично по половині обмоток НН та ВН. Половини обмоток НН та ВН відповідно з'єднуються послідовно або паралельно при умові, щоб їх магнітні потоки додавались.

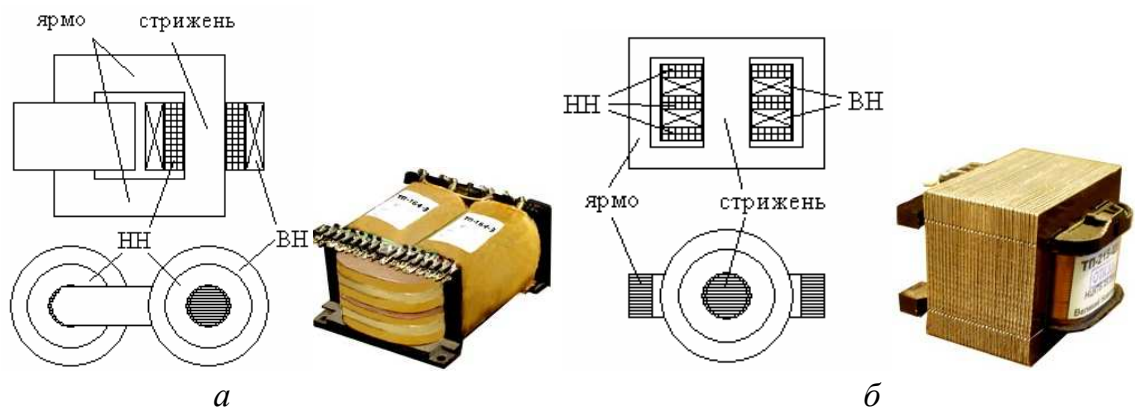


Рисунок 7.5

У однофазному броньовому трансформаторі (рис. 7.5, *б*) обмотки ВН та НН розділені на частини у формі дисків, які по чергово розташовуються тільки на середньому стрижні, а з боків закриваються двома ярмами, що замикають магнітопровід. Оскільки потік осердя в ярмах роздвоюється, перетин кожного ярма дорівнює половині перетину стрижня.

Принцип дії трансформатора заснований на явищі електромагнітної взаємодукції. Якщо первинну обмотку підключити до джерела синусоїдної напруги U_1 , то в ній виникає змінний струм I_1 . Цей струм створює магнітне поле, яке посилюється сталевим осердям. Невелика частина поля у вигляді потоку розсіювання Φ_p замикається навкруги витків первинної обмотки в основному по повітрю. Основна частина магнітного поля сконцентрована в осерді і утворює основний (робочий) магнітний потік Φ , який зчеплений з обома обмотками.

Згідно закону електромагнітної індукції основний магнітний потік Φ в первинній і вторинній обмотках наводить ЕРС, відповідно, для миттєвих значень:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (7.1)$$

для діючих значень:

$$E_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 \cdot w_2 \cdot f \cdot \Phi_m. \quad (7.2)$$

Вторинна обмотка трансформатора з ЕРС e_2 являє собою джерело електроенергії для споживачів.

Таким чином, у первинному колі з обмоткою w_1 електроенергія джерела перетворюється в енергію магнітного поля, що передається по осердю, яка у вторинному колі з обмоткою w_2 , навпаки, перетворюється в електричну енергію тієї ж частоти, але з іншими значеннями струму і напруги.

Основним параметром трансформатора виступає коефіцієнт трансформації, який являє собою відношення ЕРС обмоток ВН до НН або кількості їх витків:

$$k = \frac{e_{\text{ВН}}}{e_{\text{НН}}} = \frac{E_{\text{ВН}}}{E_{\text{НН}}} = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}}. \quad (7.3)$$

Якщо вторинна обмотка не навантажена (неробочий режим, $I_2 = 0$), струм у первинній обмотці дуже малий і можна вважати, що $u_1 = -e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt}$, $u_2 = -e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt}$ (рис. 7.6).

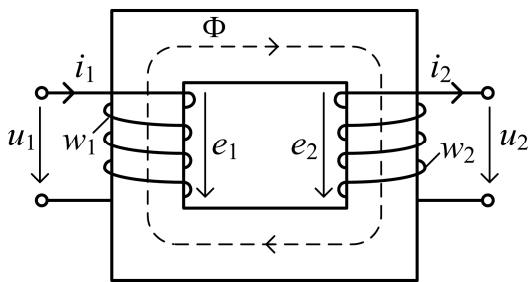


Рисунок 7.6

Відповідно коефіцієнт трансформації від первинної обмотки до вторинної буде таким:

$$k_{12} = \frac{u_1}{u_2} = w_1 \frac{d\Phi}{dt} / w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Для діючих значень напруги U_1 і

U_2 коефіцієнт трансформації такий же:

$$k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

При $k_{12} > 1$ трансформатор буде знижувальний, тобто $U_2 < U_1$.

При $k_{12} < 1$ трансформатор буде підвищувальний ($U_2 > U_1$).

Враховуючи те, що передача повної потужності від первинної до

вторинної обмотки відбувається з відносно малими втратами, тобто $S_1 \cong S_2$, отримуємо зв'язок коефіцієнта трансформації k_{12} зі струмами у первинній обмотці I_1 і вторинній – I_2 .

$U_1 I_1 = U_2 I_2$, що надає:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = k_{12}, \quad I_2 = k_{12} I_1. \quad (7.4)$$

Тобто у знижувальному трансформаторі струм на виході більше ніж струм у первинній обмотці. У підвищувальному трансформаторі – навпаки.

Трансформатор має *властивість оборотності*, тобто залежно від того, яка обмотка (НН або ВН) буде первинною (підключеною до джерела живлення), він може бути як підвищувальним, так і знижувальним. Тому, в експлуатації користуються коефіцієнтом трансформації (7.3)

$k = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}}$, який подає зв'язок між високою й низькою напругами. Він завжди більше за одиницю незалежно від того, підвищувальний трансформатор або знижувальний.

7.3. Робота трансформатора при навантаженні

Поки вторинна обмотка розімкнута, а первинна знаходиться під номінальною напругою $U_{1н}$, в ній протікає струм I_{10} , який утворює МРС $F_{10} = w_1 I_{10}$ і відповідний магнітний потік Φ (рис. 7.7).

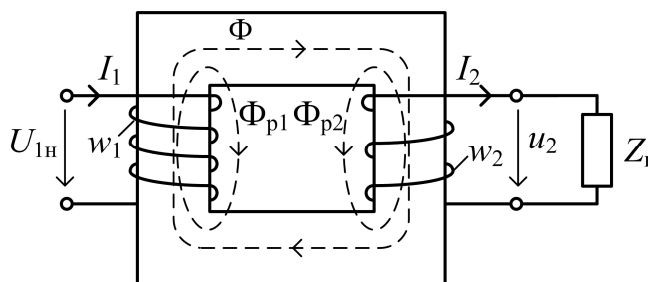


Рисунок 7.7

При підключенні навантаження Z_n у вторинній обмотці з'являється струм I_2 , який утворює зустрічну МРС $F_2 = w_2 I_2$. Урівноваження цієї МРС, а також підтримування основного магнітного потоку

Φ , відбувається внаслідок збільшення МРС первинної обмотки до величини $F_1 = F_{10} + F_2$. У свою чергу, зростання МРС F_1 і F_2 призводить до появи та зростання магнітних потоків розсіювання Φ_{p1} і Φ_{p2} (рис. 7.7).

Таким чином, трансформатор при навантаженні являє собою дві індукційно зв'язані реальні котушки із загальним осердям. Останнє надає можливість привести параметри вторинної обмотки до параметрів первинної (рис. 7.8, а, б).

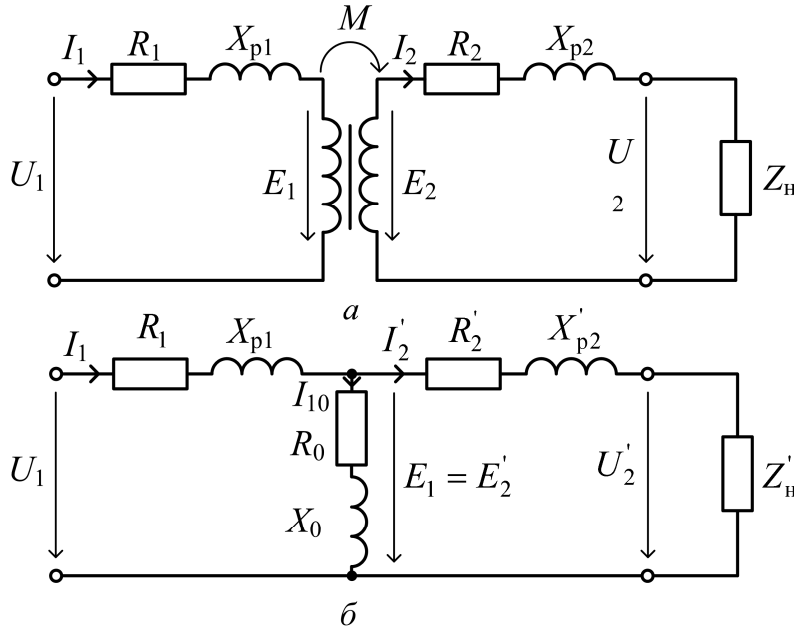


Рисунок 7.8

Дійсно, $\frac{E_1}{E_2} = k_{12}$, звідки $E_2' = k_{12}E_2 = E_1$, а $U_2' = k_{12}U_2$. З рівняння МРС $F_1 = F_{10} + F_2$, якщо подати його у вигляді $w_1I_1 = w_1I_{10} + w_2I_2$, отримуємо $I_1 = I_{10} + \frac{w_2}{w_1}I_2 = I_{10} + I_2'$, де $I_2' = \frac{I_2}{k_{12}}$, I_{10} – струм намагнічування.

Для визначення приведених опорів скористаємося законом Ома:

$$Z_H' = \frac{U_2'}{I_2'} = \frac{k_{12}^2 U_2}{I_2} = k_{12}^2 Z_H. \quad (7.5)$$

Відповідно,

$$R_2' = k_{12}^2 R_2; \quad X_{p2}' = k_{12}^2 X_{p2}. \quad (7.6)$$

Враховуючи те, що $I_{10} \ll I_{1н}$, схему заміщення трансформатора можна суттєво спростити, прийнявши $I_2' = I_1$. Тобто, зі схеми видаляється вітка намагнічування (R_0, X_0), яка потрібна тільки в неробочому режимі, і об'єднуються активні й індуктивні параметри первинної та вторинної обмоток: $R_k = R_1 + R_2'$; $X_k = X_{p1} + X_{p2}'$ (рис. 7.9).

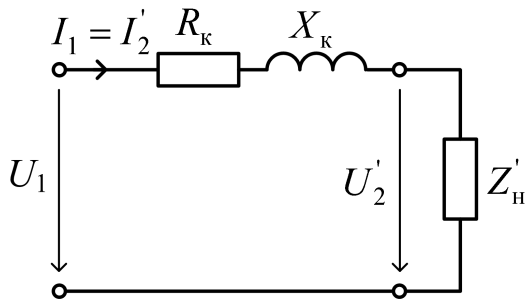


Рисунок 7.9

Для такої спрощеної схеми заміщення рівняння електричної рівноваги має вигляд:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 + R_k \underline{I}_1 + jX_k \underline{I}_1. \quad (7.7)$$

Векторні діаграми для різного характеру навантаження приведені на рис. 7.10: для активно-індуктивного

навантаження (рис. 7.10, а) і активно-ємнісного (рис. 7.10, б).

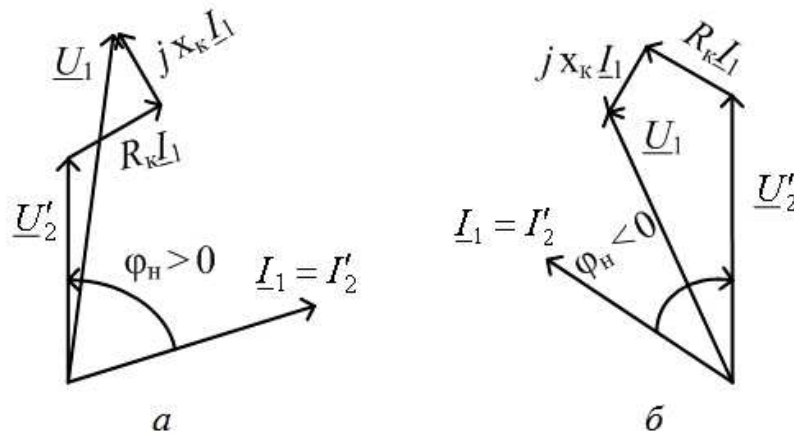


Рисунок 7.10

Параметри схеми заміщення як для неробочого режиму (R_0, X_0), так і для спрощеної схеми (R_k, X_k) визначаються з дослідів холостого ходу і короткого замикання.

7.4. Визначення параметрів спрощеної схеми заміщення трансформатора

7.4.1. Дослід холостого ходу (неробочій режим)

По вольтметру V1 установлюється номінальна напруга $U_{1н}$. Вимірюються: струм у первинній обмотці I_{10} ; втрати потужності P_x ; напруга на вторинній обмотці U_{20} (рис. 7.11).

Розраховуються параметри:

$$Z_0 = \frac{U_{1н}}{I_{10}}; R_0 = \frac{P_x}{I_{10}^2}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (7.8)$$

Перевіряється коефіцієнт трансформації:

$$k_{12} = \frac{U_{1H}}{U_{20}}. \quad (7.9)$$

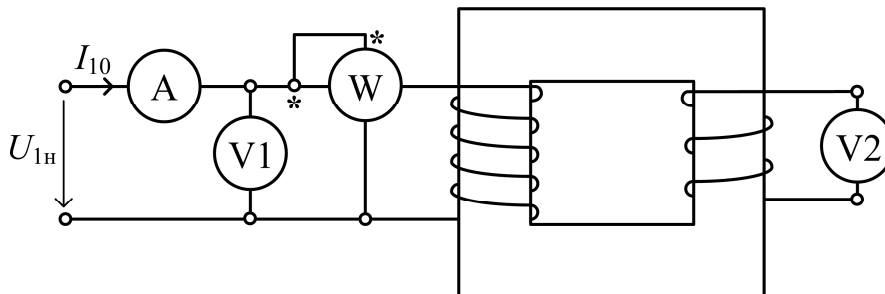


Рисунок 7.11

7.4.2. Дослід короткого замикання

За допомогою регулятора напруги РН (рис. 7.12), починаючи з нульового по амперметру А1 встановлюється номінальний струм I_{1H} у первинній обмотці. Вимірюються: напруга U_K (вольтметром V1), втрати потужності P_K , струм у вторинній обмотці I_{2K} (амперметром А2).

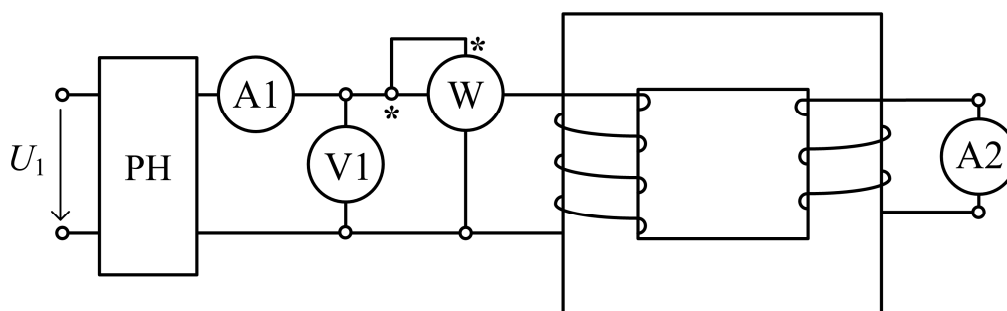


Рисунок 7.12

Розраховуються параметри:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1H}}; R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2}; X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \phi_K = \arctg \frac{X_K}{R_K}. \quad (7.10)$$

Перевіряється коефіцієнт трансформації:

$$k_{12} = \frac{I_{2K}}{I_{1H}}. \quad (7.11)$$

Визначається відносна напруга короткого замикання:

$$u_K \% = \frac{U_K}{U_{1H}} \cdot 100 \%. \quad (7.12)$$

7.4.3. Раптове коротке замикання

Виникає при роботі трансформатора з номінальною напругою на вході. Якщо таке замикання відбулося на виході із трансформатора, тобто зовнішнє навантаження повністю відпадає і вторинна обмотка замикається сама на себе, то утворюється аварійна ситуація. Вся напруга припадає на внутрішній опір трансформатора Z_k і струм в трансформаторі зростає у відношенні $\frac{100}{u_k \%}$, тобто в 10–15 разів. Трансформатор треба негайно вимикати з електричної мережі.

7.5. Експлуатаційні характеристики однофазного трансформатора

7.5.1. Зовнішня характеристика

Показує залежність напруги на виході із трансформатора U_2 від його навантаження. Напруга на вході $U_1 = \text{const}$.

Навантаження трансформатора визначається струмом I_2 , відносно значення якого $\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$.

Відповідно до нього:

$$U_2 = U_{20} \left[1 - \beta \frac{u_k \%}{100} \cos(\varphi_k - \varphi_n) \right]. \quad (7.13)$$

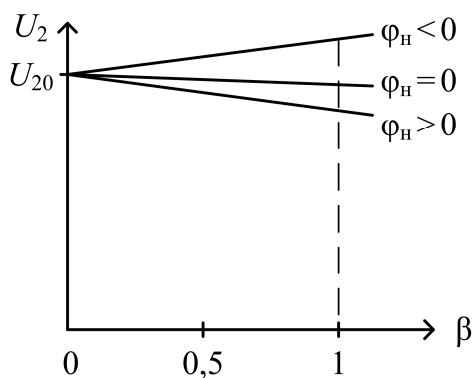


Рисунок 7.13

Якщо характер навантаження активний ($\varphi_n = 0$) або активно-індуктивний ($\varphi_n > 0$), то $\cos(\varphi_k - \varphi_n)$ завжди більше нуля і напруга на виході буде зменшуватися при збільшенні навантаження (рис. 7.13).

Якщо характер навантаження активно-ємнісний ($\varphi_n < 0$), то $(\varphi_k - \varphi_n)$ може бути більше 90° , а $\cos(\varphi_k - \varphi_n) < 0$.

У цьому випадку напруга на виході може зростати зі збільшенням навантаження (рис. 7.13).

7.5.2. Характеристика ККД

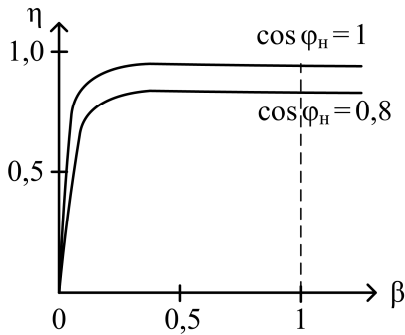


Рисунок 7.14

Показує залежність ККД від навантаження за умови $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$.

Потужність, яку трансформатор забирає з електричної мережі $P_1 = P_2 + P_M + P_E$, де P_2 – корисна потужність, що віддається споживачу; $P_M = P_X$ – магнітні втрати, що при незмінних напрузі U_1 і частоті f_1 дорівнюють втратам у неробочому режимі; $P_E = \beta^2 P_K$ – електричні

втрати, які пропорційні квадрату струмів в обмотках трансформатора, а в номінальному режимі ($\beta = 1$) дорівнюють втратам короткого замикання.

Враховуючи те, що $P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_n = \beta I_2 U_2 \cos \varphi_n \approx \beta S_n \cos \varphi_n$, ККД буде дорівнювати:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_E} = \frac{\beta S_n \cos \varphi_n}{\beta S_n \cos \varphi_n + P_X + \beta^2 P_K}. \quad (7.14)$$

При малих β він буде лінійно зростати, але в діапазоні $\beta = 0,7-0,8$ (найбільш вірогідні робочі режими) досягне максимуму $P_M = P_E$, а потім почне зменшуватися, бо в знаменнику почне переважати β^2 . Збільшення $\cos \varphi_n$ сприяє збільшенню ККД.

У потужних трансформаторах коефіцієнт корисної дії досягає значень 0,995 і вище.

7.6. Трифазні трансформатори

Трифазні трансформатори утворені з трьох однофазних трансформаторів, магнітопроводи яких об'єднані в один спільний трьохстрижневий магнітопровід. Таку конструкцію отримаємо, якщо три однофазних трансформатори підключити до трифазної мережі, а їх первинні обмотки з'єднати «зіркою» або «трикутником». В неробочому режимі з'являться струми холостого ходу, які будуть мати однакові значення, зсунуті відносно один одного на 120° (рис. 7.15, а). Магнітні потоки також будуть зсунуті на 120° між собою.

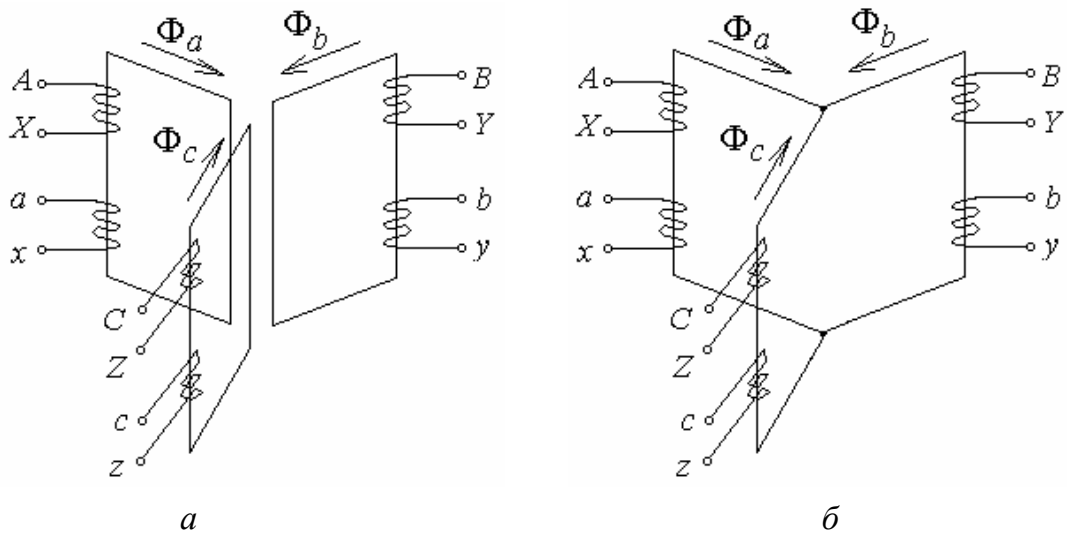


Рисунок 7.15

Сума магнітних потоків, так само як і сума струмів, дорівнюватиме нулю.

Якщо три стрижні перетворити в один загальний, то в ньому магнітного потоку не буде, і потреба у ньому відпадає. У результаті утворюється трифазний трансформатор без внутрішнього стрижня (рис. 7.15, б).

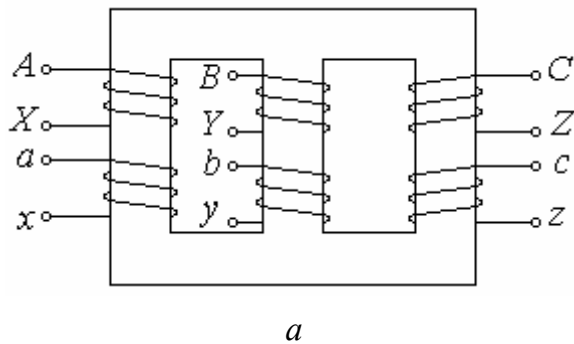


Рисунок 7.16

Однак технічно такий трансформатор виготовити складно. Конструктивно простіше всі стрижні розташувати в одній площині (рис. 7.16). По суті при цьому нічого не зміниться, лише зменшиться довжина магнітопроводу середнього стрижня *B*. Це трохи порушить симетрію магнітопроводу трансформатора і призведе до того, що струм *IX* середнього стрижня *B* буде трохи менше за струми в стрижнях *A* і *C* (рис. 7.16, *a*). Однак ця асиметрія не має практичного значення.

Кожна фаза трифазного трансформатора – це по суті однофазний транс-

форматор. Тому при рівномірному навантаженні кожної фази аналіз і розрахунок, а також схема заміщення трифазного трансформатора будуть такими ж, як і однофазного трансформатора. Загальний вигляд такого трансформатора показаний на рис. 7.16, б.

При з'єднанні обмоток ВН і НН трифазного трансформатора «зіркою» (Y) або «трикутником» (Δ) можна отримати чотири основних варіанти (груп) – схем з'єднання (ВН/НН): Y/Y, Y/ Δ , Δ / Δ , Δ /Y.

Коефіцієнтом трансформації трифазного трансформатора являється лінійний коефіцієнт трансформації, обумовлений як відношення лінійних напруг (більшої до меншої):

$$k = \frac{U_{л1}}{U_{л2}}. \quad (7.15)$$

Залежно від способу з'єднання обмоток він може бути і нерівним фазному коефіцієнту трансформації:

$$k_{\phi} = \frac{U_{\phi1}}{U_{\phi2}} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (7.16)$$

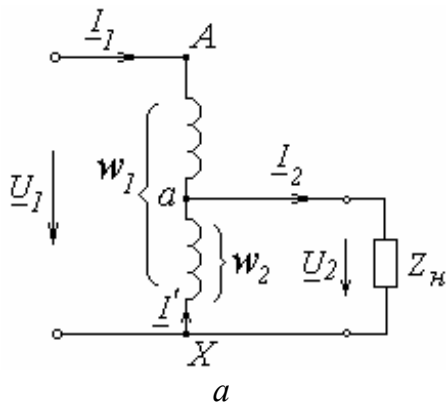
Лінійний коефіцієнт трансформації для вищезазначених чотирьох схем з'єднання обмоток трифазного трансформатора (ВН/НН) через k_{ϕ} визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} k_{Y/Y} &= \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi1}}{\sqrt{3}U_{\phi2}} = k_{\phi}; \\ k_{Y/\Delta} &= \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi1}}{U_{\phi2}} = \sqrt{3}k_{\phi}; \\ k_{\Delta/\Delta} &= \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{U_{\phi1}}{U_{\phi2}} = k_{\phi}; \\ k_{\Delta/Y} &= \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{U_{\phi1}}{\sqrt{3}U_{\phi2}} = \frac{1}{\sqrt{3}}k_{\phi}. \end{aligned} \quad (7.17)$$

Таким чином, значення вторинної напруги трифазного трансформатора залежить не тільки від відношення чисел витків фаз обмотки (k_{ϕ}), але і від способу їх з'єднання.

7.7. Автотрансформатори

Автотрансформатор являє собою трансформатор, в якого вторинна обмотка НН є частиною первинної обмотки ВН. Конструктивно автотрансформатор не відрізняється від звичайного трансформатора, тільки на його замкненому сталевому осердді розташовується одна обмотка ВН з числом витків w_1 . Ця обмотка в знижувальному трансформаторі підключається до мережі змінного струму з напругою U_1 . З частини цієї ж обмотки з числом витків w_2 знімається трансформована напруга U_2 .



На практиці широко застосовуються одно- та трифазні автотрансформатори, які можуть працювати в якості знижувальних або підвищувальних. На рис. 7.17, а показана схема однофазного автотрансформатора. Загальний вигляд лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), призначеного для плавного регулювання напруги показаний на рис. 7.17, б.



б

Рисунок 7.17

Коефіцієнт трансформації знижувального автотрансформатора:

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2}. \quad (7.18)$$

Струми та напруги навантаженого автотрансформатора з незначними втратами знаходяться у зворотній залежності:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx k. \quad (7.19)$$

По спільній частині витків обмоток тече струм:

$$I' = I_2 - I_1 = I_1 k - I_1 = I_1 (k - 1). \quad (7.20)$$

Отже, спільна частина витків може бути намотана проводом меншого поперечного перетину. За рахунок цього відбувається економія міді. Ці переваги є суттєвими при невеликому коефіцієнті трансформації $k < 2$.

Основним недоліком автотрансформатора є електричний зв'язок між обмотками ВН та НН. Це потребує посилення ізоляції всієї його обмотки. У випадку обриву обмотки на ділянці $a-X$ (рис. 7.17, a) вторинне коло з приймачем попадають під напругу джерела U_1 , а при КЗ на цій ділянці інша частина обмотки $a-A$ з малим опором – під напругу джерела, що й викликає в ній великий струм КЗ.

При великому коефіцієнті трансформації $k > 2$ автотрансформатори, як правило, не застосовують.

7.8. Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори застосовуються в колах змінного струму для розширення меж вимірювання електровимірювальними приладами, в установках ВН – додатково і для ізолювання їх від струмопровідних частин, а також для забезпечення обслуговуючого персоналу від напруги при проведенні вимірювань в мережах високої напруги.

Залежно від призначення виділяються вимірювальні трансформатори струму (ТС) і напруги (ТН).

7.8.1. Вимірювальний трансформатор струму

Вимірювальні трансформатори струму (ТС) використовуються в електроустановках для вимірювання струму. Первинна обмотка з виводами Л1 і Л2 («Лінія») вмикається в силове коло послідовно з навантаженням (рис. 7.18). В якості первинної обмотки може використовуватися сам лінійний провід (рис. 7.18, a), або це може бути первинна обмотка

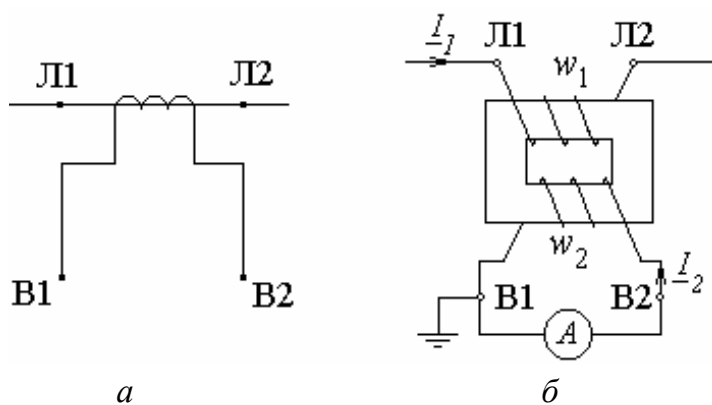


Рисунок 7.18

однофазного трансформатора звичайної конструкції (рис. 7.18, b). До вторинної обмотки з виводами В1 і В2 («Вимірювання») підключається амперметр. Трансформатори струму виготовляються на номінальні первинні

струми 5–40000 А, а номінальний вторинний струм звичайно становить 5 А. Трансформатор струму – це підвищувальний трансформатор ($w_2 > w_1$), і в ньому забезпечується зниження струму.

Коефіцієнт трансформації ТС:

$$k = \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{I_{1\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}}. \quad (7.21)$$

Коефіцієнт трансформації струму:

$$k_I = \frac{I_1}{I_2} \quad (7.22)$$

відрізняється від коефіцієнта трансформації ТС ($k_I > k$). Точно k_I невідомо, через те що воно залежить від вимірюваного первинного струму і опору навантаження. Тому первинний струм I_1 по вимірюваному значенню вторинного струму I_2 визначається приблизно через коефіцієнт трансформації ТС k за формулою:

$$I_1 \approx k I_2. \quad (7.23)$$

Відносна похибка вимірювання струму з урахуванням (7.22) та (7.23):

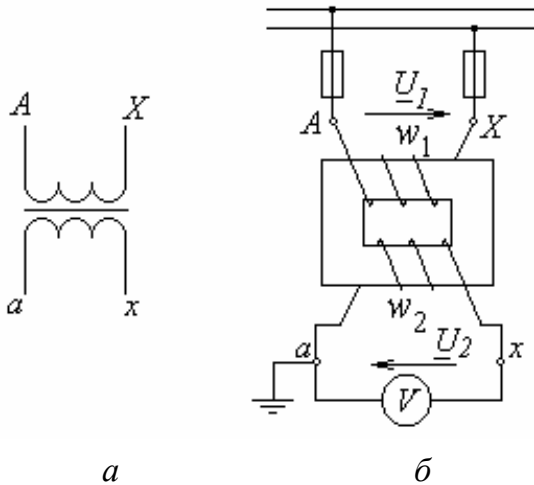
$$\gamma = \frac{kI_2 - k_I I_2}{k_I I_2} \cdot 100 \% = \frac{k - k_I}{k} \cdot 100 \%. \quad (7.24)$$

Таким чином, для ТС похибка вимірювання струму дорівнює похибці коефіцієнта трансформації.

Особливості ТС полягають в наступному: його первинний струм, який визначається силовим навантаженням, практично не залежить від вторинного струму, а його номінальний режим близький до режиму КЗ. Неробочий хід для цього трансформатора неприпустимий, оскільки зникає розмагнічувальна дія струму I_2 , що призводить до сильного зростання магнітного потоку Φ і ЕРС E_2 . Також це спричиняє великі втрати у сталевому осерді, а відтак і неприпустимий перегрів ТС. Тому перш ніж знімати вимірювальний амперметр на повірку, потрібно обов'язково замкнути виводи В1 і В2.

7.8.2. Вимірювальний трансформатор напруги

Вимірювальні трансформатори напруги (ТН) застосовуються в електроустановках змінного струму для вимірювання напруги, а також в



а

б

Рисунок 7.19

роботі реле захисту та інших елементів автоматики. По будові і зовнішньому вигляду вони схожі з силовими трансформаторами невеликої (не перевищує 2 кВА) потужності (рис. 7.19, б). Виводи обмоток ВН та НН позначаються такими ж буквами, як і у звичайних силових трансформаторів (рис. 7.19, а). Це знижуючі трансформатори ($w_1 > w_2$).

Особливість ТН полягає в тому, що номінальний режим для них неприпустимий. Вимірювальний ТН працює в режимах, близьких до неробочого режиму, так як опір котушок приладів, які підключаються до вторинної обмотки, дуже великий. Обмотки у цього трансформатора виготовляються з досить тонкого мідного проводу і тому він боїться режимів навантаження та КЗ.

Коефіцієнт трансформації ТН дорівнює відношенню чисел витків його первинної і вторинної обмоток:

$$k = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}}. \quad (7.25)$$

Коефіцієнт трансформації напруги дорівнює відношенню первинної і вторинної напруги:

$$k_U = \frac{U_1}{U_2}. \quad (7.26)$$

Звичайно невідомий, через те що він залежить від режиму роботи трансформатора ($k_U < k$). Тому первинну напругу ВН визначають приблизно по виміряній вторинній через коефіцієнт трансформації k :

$$U_1 = k U_2. \quad (7.27)$$

Намагаються струм ХХ зробити якомога меншим, для чого ставлять високі вимоги до осердя.

Відносна похибка вимірювання напруги з урахуванням (7.26) та (7.27):

$$\gamma = \frac{kU_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{k - k_U}{k} \cdot 100\%. \quad (7.28)$$

Запитання для самоконтролю

1. Що називається трансформатором і з яких елементів він складається?
2. Поясніть принцип дії трансформатора.
3. Що таке коефіцієнт трансформації і як він пов'язує напруги та струми обмоток трансформатора?
4. Запишіть рівняння рівноваги напруг і струмів в обмотках трансформатора і поясніть фізичний смисл складових цих рівнянь.
5. Як побудувати векторну діаграму трансформатора?
6. Як визначається корисна та споживана потужності трансформатора?
7. Які втрати потужності бувають у трансформаторі?
8. Як проводять дослід неробочого ходу і які параметри трансформатора можна визначити за даними цього дослідження?
9. Як проводять дослід короткого замикання і які параметри трансформатора можна визначити за даними цього дослідження?
10. Як проводять дослід навантаження і які експлуатаційні характеристики отримують за даними цього дослідження?
11. Назвіть спеціальні типи трансформаторів і яке їх призначення?

Розділ 8

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ (загальне)

Електричною машиною називається електротехнічний пристрій, призначений для електромеханічного перетворення енергії. У залежності від напрямку перетворення енергії розрізняють: *генератори* – електричні машини, що перетворюють механічну енергію в електричну; *двигуни* – електричні машини, що перетворюють електричну енергію в механічну.

Електричним машинам, як і трансформаторам, властивий *принцип оборотності*, тобто одна й та же електрична машина залежно від напрямку перетворення енергії може бути генератором або двигуном.

8.1. Види потужності в електричній машині

Крім вхідних і вихідних видів потужності: електричної, що визначається напругою U і струмом I ($P_E = UI$) та механічної, що визначається моментом на валу M та обертами n ($P_{\text{МЕХ}} = M \cdot n$) – в процесі електромеханічного перетворення енергії ключове значення має електромагнітна потужність $P_{\text{ЕМ}} = EI$, яка відповідає силовій взаємодії струмів і магнітного поля в середині електричної машини. Потoki цих потужностей в режимах генератора і двигуна показані на рис. 8.1.

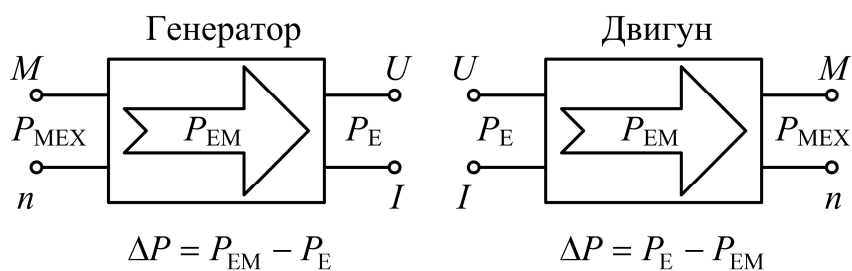


Рисунок 8.1

У наслідок того, що потужності P_{EM} і P_{MEH} визначаються однаковим моментом M , вони близькі одна до одної $P_{EM} \cong P_{MEH}$ (різницю вносить частота обертання). Тому можна вважати, що втрати в електричній машині ΔP утворює різниця електричної і електромагнітної потужностей.

8.2. Види електричних машин

У залежності від струму живлення розрізняють *електричні машини постійного струму* і *електричні машини змінного струму* (рис. 8.2).

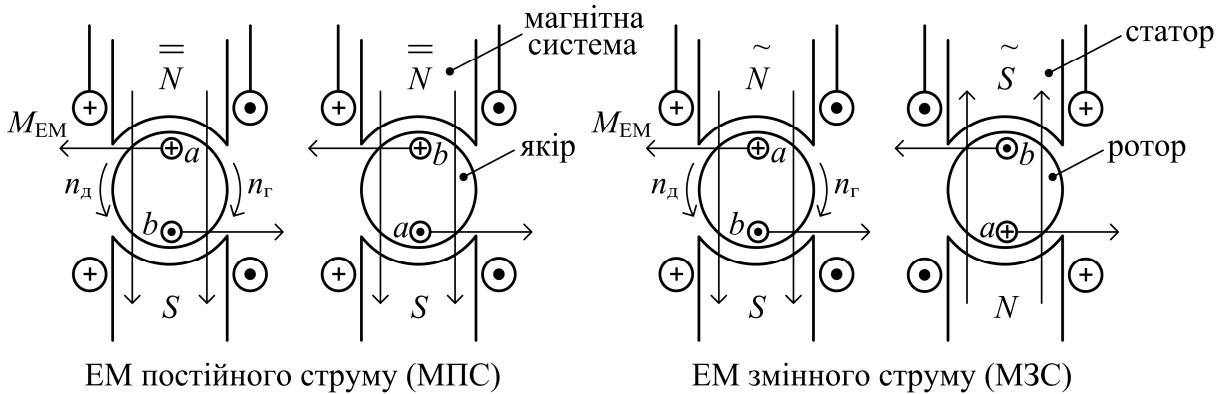


Рисунок 8.2

В електричній машині постійного струму нерухома магнітна система утворює незмінний у просторі магнітний потік. Провідники зі струмом, розташовані на обертовій частині електричної машини постійного струму (якорі), знаходяться у силовій взаємодії з цим магнітним потоком. Відповідно до правила лівої руки утворюється електромагнітний момент M_{EM} , який у режимі двигуна співпадає з напрямом обертання якоря n_d , а в режимі генератора протидіє його обертання n_r , яке забезпечується зовнішнім механічним приводом. Для забезпечення нормальної роботи електричної машини постійного струму необхідно, щоб напрям струму в провідниках обмотки якоря змінювався на протилежний при потраплянні їх під іншу полярність магнітної системи.

В електричній машині змінного струму просторовий напрям магнітного поля змінюється з періодичністю зміни струму в обмотці нерухомого статора. Обертання ротора забезпечується тим, що напрям струму в провідниках його обмотки не змінюється й завжди відповідає полярності магнітного потоку, що змінюється. Таким чином, як і в електричній машині постійного струму, забезпечується незмінна силова взаємодія магнітного поля статора зі струмом у роторі, а щодо напрямку його обертання, то воно визначається теж як в електричній машині постійного струму.

Запитання для самоконтролю

1. Що називається електричною машиною?
2. З яких елементів складається електрична машина?
3. Як розрізняють електричні машини у залежності від напрямку перетворення енергії?
4. Назвіть види потужності в електричній машині?
5. Назвіть види електричних машин, чим вони відрізняються?

Розділ 9

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Машина постійного струму можуть працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. В теперішній час вони застосовуються в основному в якості двигунів приводів машин та механізмів, які потребують плавного та економічного регулювання частоти обертання в широких межах також великих перевантажувальних і пускових моментів. Наприклад в електротязі, а також в металургії для приводу прокатних станів.

До недоліків машин постійного струму відносяться складність конструкції та ненадійність в роботі через наявність колектора.

9.1. Будова та принцип дії машини постійного струму

Машина постійного струму складається з трьох основних частин: нерухомої магнітної системи, обертального якоря і колекторного вузла при ньому. На рис. 9.1 машина постійного струму представлена як схематично (рис. 9.1 *а, б*), так і в реальному вигляді (рис. 9.1 *в, г*).

Магнітна система містить станину 1, який являє собою полий сталевий циліндр, головні полюси 2, що кріпляться до станини (завжди шихтовані) з полюсними наконечниками. Обмотка збудження 3 встановлена на головних полюсах. Додаткові полюси 4 з обмоткою 5 розташовуються між головними полюсами.

Якір складається з шихтованого осердя 6, яке посаджене на вал 7. Обмотка якоря 8 укладена в пази осердя, в якому виконані канали для охолодження 9. Колекторний вузол містить колектор 10, виконаний з окремих колекторних мідних пластин. На колекторі встановлюються щітки 11 (вугільно-графітні), які за допомогою щіткотримача з'єднані з траверсою 12.

Крім того, машина містить вентилятор 13, який посаджений на вал, підшипникові щити 14, що встановлені на підшипниках 15. Машина прикріплюється до основи за допомогою лап 16.

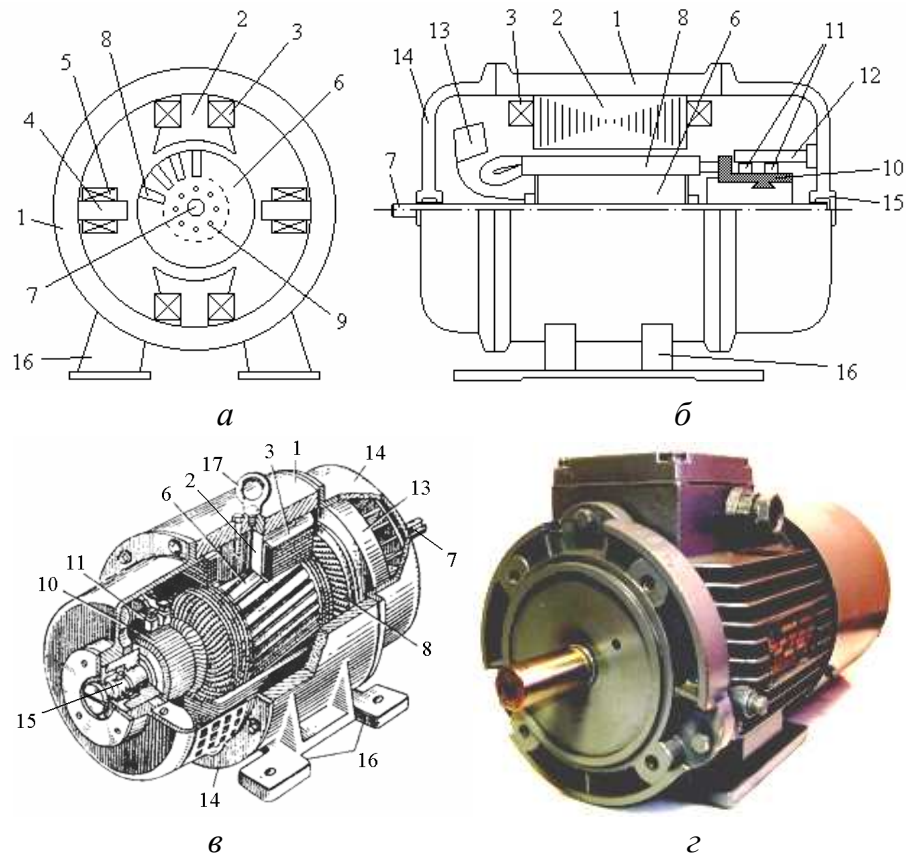


Рисунок 9.1

Більш детально елементи магнітної системи показані на рис. 9.2, а елементи якоря і колектора, а також їх конструктивні особливості – на рис. 9.3.

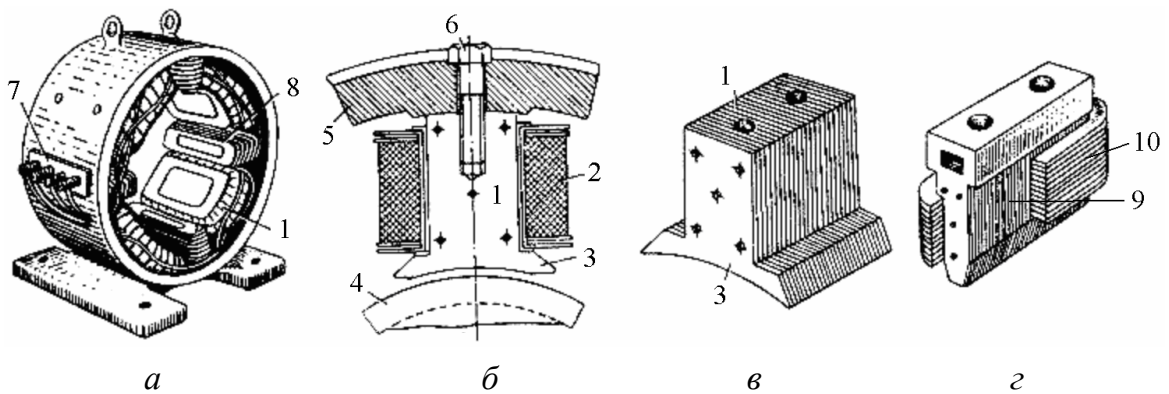


Рисунок 9.2

Загальний вид магнітної системи та її поперечний переріз показані на рис. 9.2 а, б та осердя головного і додаткового полюсів на рис. 9.2 в, г, де 1 – осердя головного полюса, 2 – обмотка збудження; 3 – полюсний наконечник; 4 – ярмір; 5 – станина; 6 – болт-«шпилька»; 7 – клемні виводи обмоток

полюсів; 8 – додатковий полюс; 9, 10 – осердя та обмотка додаткового полюса.

Загальний вид осердя якоря зображений на рис. 9.3, *а*. Він набирається з окремих ізольованих лаком штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм (рис. 9.3, *б*), стягується натискними шайбами 1 і має канавки 2 під бандаж для обмотки. Колектор (рис. 9.3, *в*) формують стяжні болти 3, заживне кільце 4, міканітова ізоляція 5, корпус-втулка 6 і колекторні пластини 7.

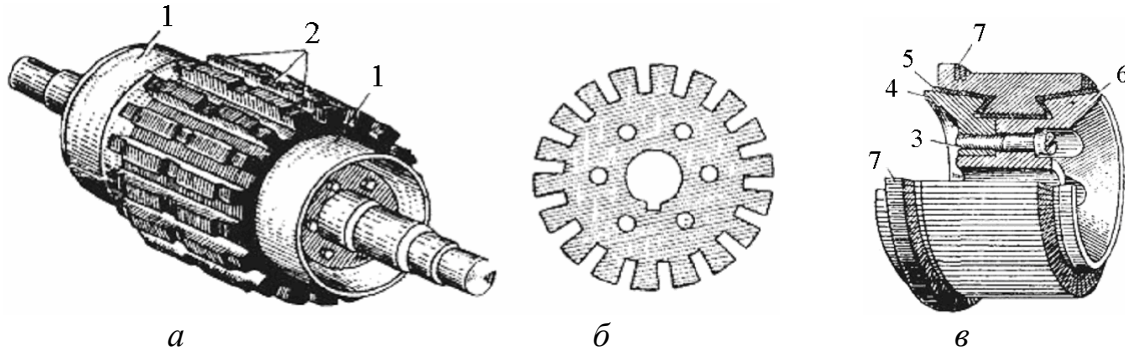


Рисунок 9.3

Кількість щіток дорівнює числу головних полюсів машини. Щітки встановлюються на колекторі по осі полюсів (при наявності додаткових полюсів) так, щоб вони з'єднувались з ділянками секцій, які в даний момент майже не перетинають силові лінії. Кожна щітка звичайно перекиває на колекторі декілька пластин. Так як секції в кожній паралельній вітці обмотки з'єднані послідовно, то їх ЕРС додаються (рис. 9.4).

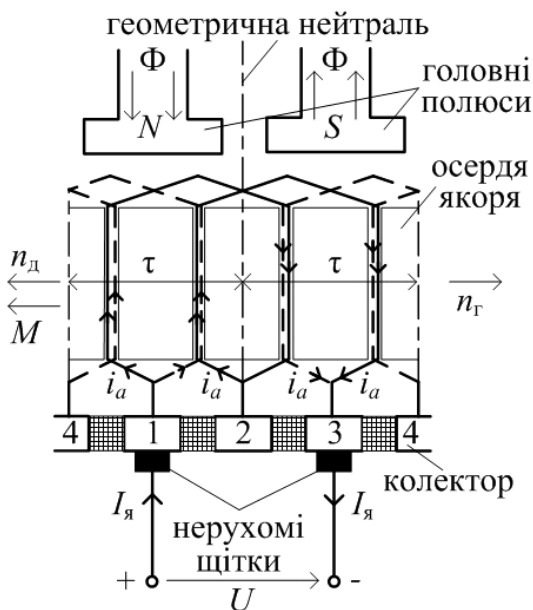


Рисунок 9.4

Обмотка якоря виконана у вигляді секцій, кінці яких припаяні до пластин колектора (рис. 9.4). Усі секції з'єднані послідовно. Секції мають по дві активні (пазові) частини. Кінець наступної секції обмотки з'єднаний з початком попередньої. Таким чином утворюється замкнена обмотка якоря. Секції обмотки вкладаються в пази якоря в певному порядку так, щоб при обертанні якоря їх частини завжди знаходились під різними полюсами статора.

Принцип дії МПС розглянемо, виділивши 2 полюсні ділення $\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$, де D_a – діаметр якоря; p – число пар полюсів.

Магнітний потік Φ , що припадає на пару головних полюсів, утворюється при проходженні струму збудження $I_{зб}$ в їх котушках.

Струм якоря $I_я$, що подається через нерухомі щітки, в обмотці якоря розділяється на паралельні струми $i_a = \frac{I_я}{2a}$, де $a = pm$ – число паралель-

них віток (у найпростішому випадку $m = 1$ – одноходова обмотка, як на рисунку). Внаслідок взаємодії N провідників зі струмом, що розташовані в пазах якоря, з магнітним потоком Φ утворюється електромагнітний момент:

$$M = C_M \Phi I_я, \quad (9.1)$$

де $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$.

Цей момент співпадає за напрямом з обертанням якоря в режимі двигуна, і зустрічний – у режимі генератора.

При обертанні якоря з кутовою частотою ω провідники перетинають магнітний потік Φ і, відповідно до правила правої руки, в них наводиться ЕРС:

$$E = C_M \Phi \omega = C_E \Phi n, \quad (9.2)$$

де $C_E = \frac{pN}{a}$.

У електричному колі якоря МПС встановлюється електрична рівновага відносно прикладеної напруги U :

– у режимі двигуна

$$U = E + R_я I_я; \quad (9.3)$$

– у режимі генератора

$$U = E - R_я I_я, \quad (9.4)$$

де $R_я$ – опір обмотки якоря.

В рівняннях (9.3) та (9.4) в опорі кола якоря $R_я$ враховуються опори обмотки якоря, щіток та колектора.

9.2. Способи збудження електричної машини постійного струму

Основні властивості та характеристики машин залежать від схеми включення обмотки збудження (способу збудження див. рис. 9.5).

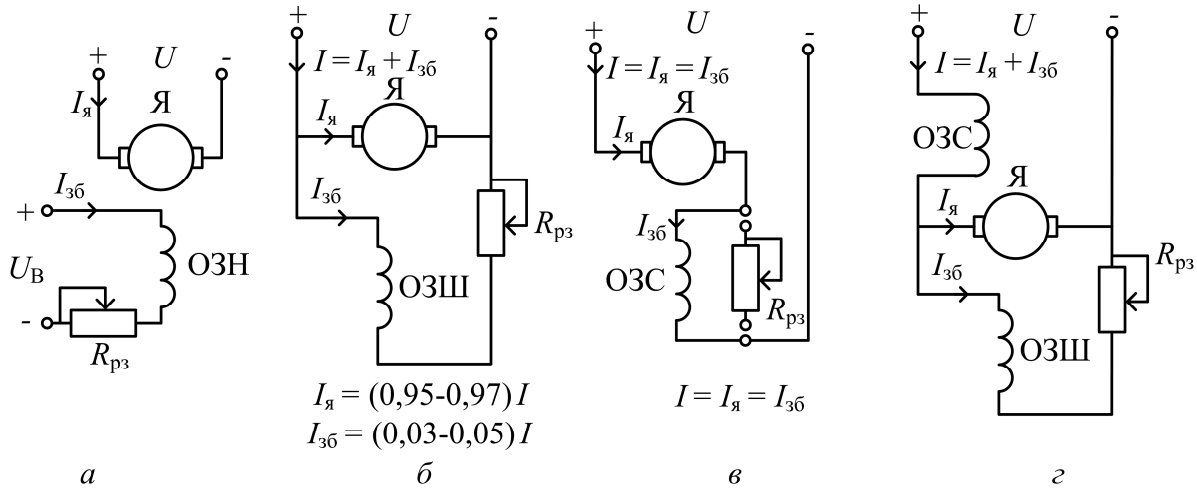


Рисунок 9.5

Якщо в машині постійного струму обмотка збудження електрично ізольована від кола якоря і живиться від стороннього джерела постійного струму (рис. 9.5, а), то її називають машиною незалежного збудження. Її особливість полягає в тому, що напруга кола збудження не залежить від потужності машини. До машин незалежного збудження відносяться також машини з постійними магнітами.

Залежно від способу з'єднання обмоток збудження і якоря розрізняють машини паралельного (рис. 9.5, б) – (шунтові), послідовного (рис. 9.5, в) – (серієсні) та змішаного (рис. 9.5, г) – (компаундні) збудження. Шунтовий струм збудження $I_{зб}$ можна також регулювати R_{pz} .

9.3. Втрати та ККД машини постійного струму

В машині постійного струму виділяють електричні, магнітні, механічні і додаткові втрати.

Магнітні втрати – це втрати у сталевих елементах машини, що складаються з втрат на гістерезис та вихрові струми:

$$\Delta p_{ст} = \Delta p_{г} + \Delta p_{в.т.} \quad (9.5)$$

В основному ці втрати мають місце в осерді якоря. Ці втрати від навантаження практично не залежать.

Електричні втрати – це втрати в обмотках (втрати у міді):

$$\Delta p_{\text{ел}} = \Delta p_{\text{м}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{оз}}^2 R_{\text{оз}}. \quad (9.6)$$

Ці втрати залежать від струму, тому вони змінні.

Механічні втрати $\Delta p_{\text{мех}}$ обумовлені усіма видами тертя.

Додаткові втрати – $\Delta p_{\text{д}}$ – втрати у полюсних наконечниках внаслідок зубчатості якоря, втрати від вихрових струмів у провідниках обмоток та ін. Вважають, що ці втрати складають 1 % від корисної потужності P_2 .

Різницю між підведеною P_1 та корисною P_2 потужностями становлять сумарні втрати машини:

$$P_1 - P_2 = \Delta p_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}}. \quad (9.8)$$

З рівняння (9.8) можна виразити:

$$P_1 = P_2 + \Delta p_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{д}}. \quad (9.9)$$

ККД машини являє собою відношення корисної потужності P_2 до витраченої P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{доб}}}. \quad (9.10)$$

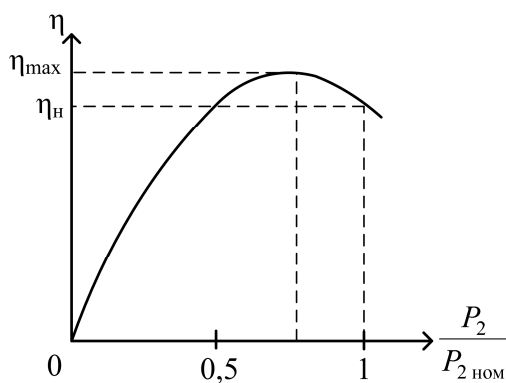


Рисунок 9.6

ККД машини постійного струму (рис. 9.6) залежно від корисної потужності P_2 спочатку швидко збільшується (від нуля при НХ до максимального η_{max} при потужності 75–85 % номінальної), а потім повільно зменшується через значні втрати в обмотці якоря. Максимальний ККД машини становить $\eta_{\text{max}} = 0,8$ для малих машин та збільшується до 0,95 для великих машин.

9.4. Реакція якоря та комутація машини постійного струму

Основний магнітний потік утворюється струмом обмотки збудження (в режимі НХ) і називається поздовжнім. Основний магнітний потік симетричний відносно полюсів та щіток (рис. 9.7, а). Струми в обмотці якоря утворюють поле якоря, яке називається поперечним (рис. 9.7, б). Тобто магнітні силові лінії основного поля симетричні відносно осі полюсів, а силові лінії поля якоря – перпендикулярні до поля основних полюсів.

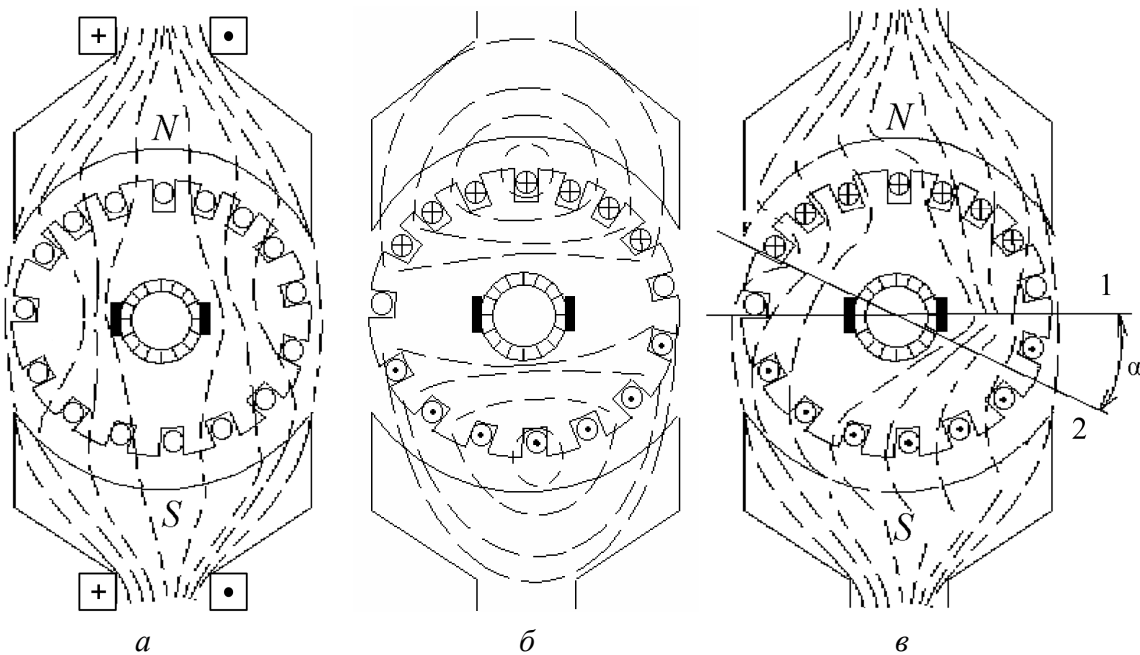


Рисунок 9.7

Таким чином, при навантаженні в якорі протікає струм, який утворює своє магнітне поле і, тим самим, спотворює симетрію магнітного поля машини (рис. 9.7, в).

Комплекс явищ, пов'язаних з впливом магнітного поля якоря на робочі характеристики машини, називають *реакцією якоря*. Внаслідок реакції якоря під одним краєм полюса магнітне поле зростає, а під іншим – зменшується. Оскільки зростання відбувається у меншій мірі внаслідок насичення осердя, то результуюче поле знижується. Фізична нейтраль 2 зміщується відносно геометричної нейтралі 1 на певний кут α (він тим більший, чим більший струм машини) – в генераторі в напрямку обертання, а в двигуні – проти обертання (рис. 9.7, в).

Явище реакції якоря є небажаним. З ним борються встановленням *додаткових полюсів*, утворюючих магнітне поле, яке направлене зустрічно полю реакції якоря.

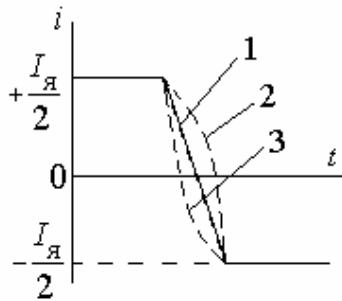


Рисунок 9.8

Комутацією називають процес перемикання секцій обмотки якоря, що обертається, при переході з одної паралельної вітки в іншу. При цьому змінюється напрямок струму за малий час в цих секціях при КЗ їх щітками (рис. 9.8).

При неправильному перебігу процесу комутації весь процес перемикання струму з одної паралельної вітки в іншу супроводжується іскрінням на колекторі.

Це лавиноподібний процес і у підсумку іскріння може вивести машину з ладу. Іскріння за певної інтенсивності може мати прогресуючий характер.

Причини іскріння бувають механічними та електричними; останні є основними і становлять ~ 80 % усіх причин.

Механічні причини виникають через стирання міді на колекторі, ексцентриситет колектора, випучування колектора, місцевий бій та ін.

Електричні причини виникають через швидке змінення струму у секції якоря. В ідеалі змінювання струму відбувається за лінійним законом (рис. 9.8, крива 1). Але при зміні струму утворюється реактивна ЕРС самоіндукції $e = -L \frac{di}{dt}$, яка перешкоджає зміні струму у секції – виходить

запізнена комутація (рис. 9.8, крива 2). Внаслідок цього в комутуючій секції залишається магнітна енергія, а розмикання секції зі значним запасом енергії призводить до електричного пробою повітряного проміжку між щіткою та колектором. Результатом електричного пробою і є інтенсивне іскріння.

Для поліпшення комутації використовують додаткові полюси, магнітне поле яких у секції, що комутується, індукує додаткову ЕРС, яка компенсує реактивну ЕРС. Додаткові полюси встановлені радіально між головними полюсами. Їх обмотка вмикається послідовно з якорем так,

щоб у комутаційній зоні поле додаткових полюсів було протилежним полю якоря. Поле додаткових полюсів може утворювати ЕРС, яка навіть буде перевищувати реактивну ЕРС, внаслідок чого виникає прискорена комутація (рис. 9.8, крива 3) і іскріння практично зникає.

9.5. Характеристики генераторів постійного струму

Генератори з послідовним, паралельним і змішаним збудженням називають генераторами з самозбудженням, оскільки джерелом для ОЗ є сам генератор.

9.5.1. Генератори з незалежним та паралельним збудженням

Неробоча характеристика (характеристика холостого ходу) – це залежність напруги на розімкнених виводах генератора від струму збудження: $U(I_{зб})$ при номінальній частоті обертання $n_{ном}$.

При незалежному збудженні $U = E$, через те що струм $I_{я} = 0$. Неробоча характеристика відповідає намагнічуванню генератора й характеризується трьома ділянками: I – ненасичена, де незначне збільшення

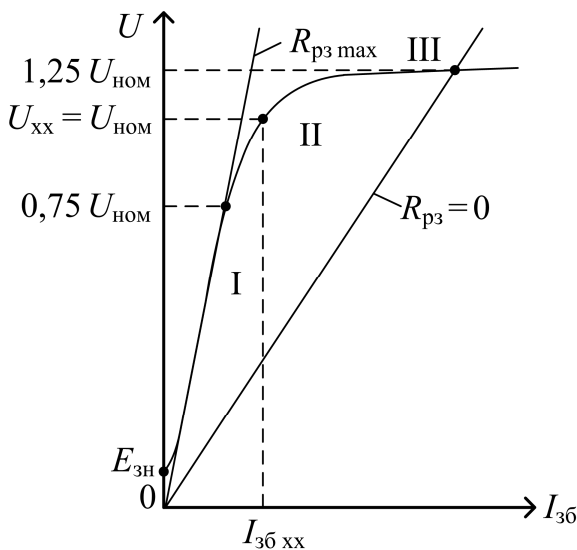


Рисунок 9.9

струму $I_{зб}$ різко збільшує ЕРС, незначні флуктуації приводять до значних коливань напруги; II – ділянка насичення, на якій уповільнюється зростання напруги при збільшенні струму збудження; це стабільна частина характеристики і посередині неї вибирається точка, що відповідає $U_{ном}$ при $I_{зб_хх}$; III – насичена ділянка, що відповідає незначному впливу збільшенню струму на збільшення напруги (рис. 9.9).

При паралельному збудженні необхідне попереднє намагнічування нерухомого генератора за схемою незалежного збудження. Тоді, після переключення на паралельне збудження, створена в генераторі залишкова

намагніченість $\Phi_{\text{зн}}$ дасть можливість при номінальній частоті обертання отримати ЕРС від залишкової намагніченості $E_{\text{зн}} = C_E \Phi_{\text{зн}} n_{\text{ном}}$. Ця ЕРС у свою чергу сприяє появленню струму збудження, який так пов'язаний з напругою:

$$I_{\text{зб}} = \frac{U}{R_{\text{оз}} + R_{\text{рз}}} \text{ або } U = (R_{\text{оз}} + R_{\text{рз}})I_{\text{зб}},$$

де $R_{\text{оз}}$, $R_{\text{рз}}$ – опори обмотки збудження і регулювального реостата.

Якщо опір регулювального реостата буде занадто великим струму збудження від залишкової ЕРС не вистачить для намагнічування генератора. Тому максимальний опір реостата вибирають за умови, що з'явиться напруга не менша за $0,75U_{\text{ном}}$. При повному виведенні реостата ($R_{\text{рз}} = 0$) $U_{\text{мах}} = 1,25U_{\text{ном}}$.

Таким чином неробоча характеристика генератора з паралельним збудженням реалізується у діапазоні $0,75U_{\text{ном}} \leq U \leq 1,25U_{\text{ном}}$ (рис. 9.9).

Зовнішня характеристика встановлює зв'язок між струмом якоря $I_{\text{я}}$ та напругою на виході з генератора U , тобто $U(I_{\text{я}})$ за умови, що $n = n_{\text{ном}}$ і збудження не регулюється.

Загальний вигляд цього зв'язку відповідно до (9.4) $U = E - R_{\text{я}}I_{\text{я}}$, тобто збільшення $I_{\text{я}}$ лінійно впливає на зменшення U .

При незалежному збудженні ЕРС $E = C_E \Phi n$ спочатку не змінюється, через те що $\Phi = \text{const}$, і тільки при $I_{\text{я}} > I_{\text{ном}}$ на основний магнітний потік починає помітно впливати реакція якоря (магнітне поле від якірного струму), і він починає зменшуватися до Φ_0 . Відповідно, починає зменшуватися E , і пришвидшується зменшення напруги U .

При $U = 0$ встановлюється струм короткого замикання $I_{\text{к}} = \frac{E_0}{R_{\text{я}}}$, де $E_0 = C_E \Phi_0 n$ (рис. 9.10).

При паралельному збудженні магнітний потік Φ починає зменшуватися з самого початку, через те що зменшення напруги U призводить до зменшення струму збудження. Напруга падає швидше ніж при незалежному збудженні, а при досягненні $I_{\text{я}} = I_{\text{мах}}$ характеристика втрачає

стійкість, через те що напруга вже не спроможна забезпечувати необхідний струм збудження. Генератор розмагнічується до рівня залишкової намагніченості $\Phi_{\text{зн}}$. Струм якоря зменшується до $I = \frac{E_{\text{зн}}}{R_{\text{я}}}$, де

$$E_{\text{зн}} = C_E \Phi_{\text{зн}} n \text{ (рис. 9.10).}$$

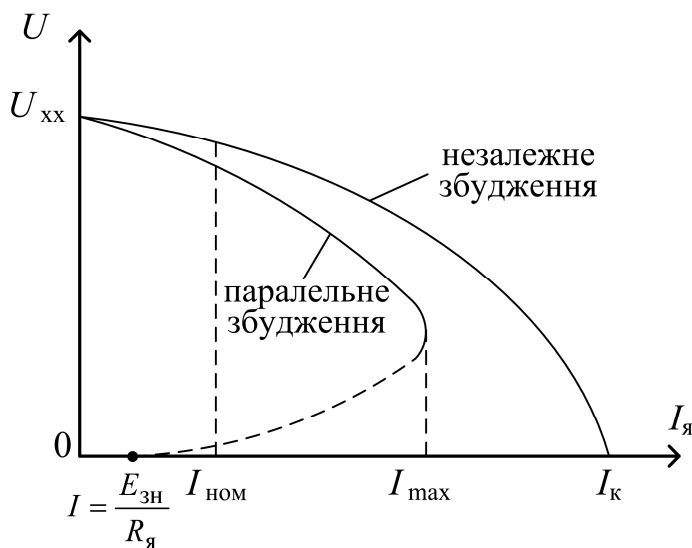


Рисунок 9.10

При незалежному збудженні збільшення навантаження і відповідно – струму якоря $I_{\text{я}}$ потребує меншого збільшення струму збудження порівняно з паралельним збудженням.

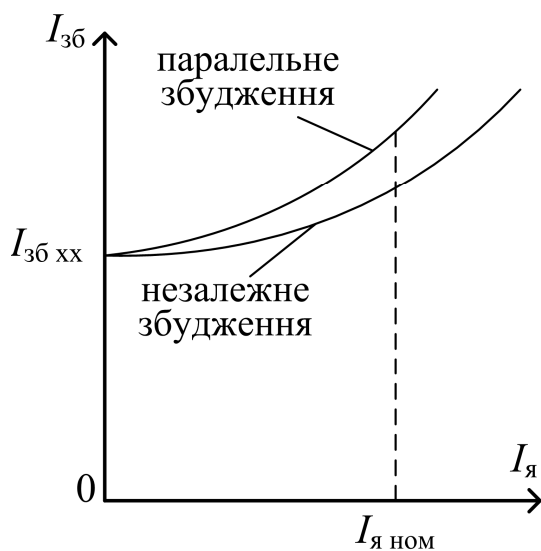


Рисунок 9.11

Регульовальна характеристика встановлює зв'язок між струмом якоря $I_{\text{я}}$ й струмом збудження $I_{\text{зб}}$, який забезпечує підтримання $U_{\text{ном}}$ на виході з генератора у всьому діапазоні навантажень. Тобто це залежність $I_{\text{зб}}(I_{\text{я}})$ за умови $U = U_{\text{ном}}$; $n = n_{\text{ном}}$ (рис. 9.11).

При незалежному збудженні збільшення навантаження і відповідно – струму якоря $I_{\text{я}}$ потребує меншого збільшення струму збудження порівняно з паралельним збудженням.

Пояснюється це тим, що при паралельному збудженні навантаження більшою мірою впливає на основний магнітний потік завдяки прямій залежності струму збудження від напруги генератора U .

Генератор послідовного збудження на практиці не застосовують внаслідок поганої зовнішньої характеристики: при збільшенні струму навантаження I відбувається і збільшення напруги U .

9.5.2. Генератор зі змішаним збудженням

У генератора зі змішаним збудженням основною є паралельна обмотка збудження ОЗШ, а послідовна обмотка (серієсна) ОЗС є допоміжною (рис. 9.12, а). Послідовна обмотка збудження ОЗС може бути увімкнена згідно або зустрічно паралельній обмотці збудження ОЗШ. При згідному включенні магнітні поля додаються, а при зустрічному включенні – віднімаються.

У цього генератора характеристика НХ така ж сама, як у попередніх.

Зовнішня характеристика: $U(I)$ знімається за умови $R_{pz} = \text{const}$; $n = \text{const}$ (рис. 9.12, б).

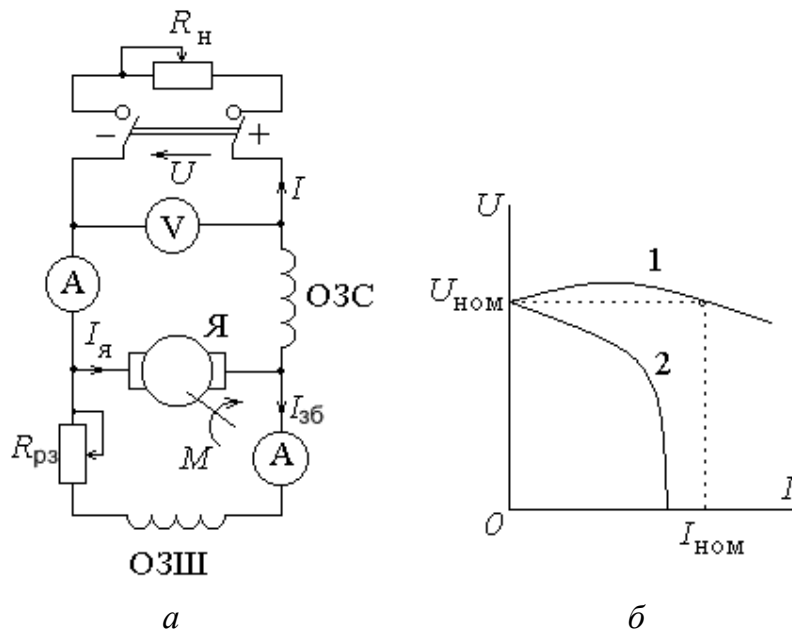


Рисунок 9.12

Якщо послідовну обмотку ОЗС приєднати згідно, то при збільшенні навантаження результуючий магнітний потік генератора буде зростати (крива 1 на рис. 9.12, б).

Послідовну обмотку ОЗС підбирають так, щоб збільшення потоку на величину $\Phi_{\text{дод}}$ компенсувало падіння напру-

ги в якорі і реакцію якоря:

$$U = C_E (\Phi + \Phi_{\text{дод}}) n - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}. \quad (9.11)$$

Число витків послідовної обмотки підбирають так, щоб номінальна напруга генератора дорівнювала напрузі НХ.

Якщо серієсну обмотку ОЗС приєднати зустрічно, то при збільшенні навантаження збільшується потік цієї обмотки $\Phi_{\text{дод}}$ і результуючий магнітний потік буде різко зменшуватись, розмагнічуючи машину (крива 2

на рис. 9.12, б). Це призведе до швидкого зменшення напруги генератора від струму навантаження:

$$U = C_E (\Phi - \Phi_{\text{доб}}) n - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}. \quad (9.12)$$

Генератор зі змішаним збудженням і зустрічною послідовною обмоткою ОЗС застосовують, наприклад, у зварювальних генераторах: постійність струму забезпечується при коливаннях довжини дуги, що необхідно для високоякісної зварки.

9.6. Двигуни постійного струму. Саморегулювання

Двигуни постійного струму застосовують набагато ширше, ніж генератори. При роботі машини постійного струму в режимі двигуна до обмотки якоря та обмотки збудження підводиться постійний струм. В цьому разі на кожний провідник якоря діє сила (за законом Ампера), яка обумовлює електромагнітний момент $M = C_M \Phi \cdot I_{\text{я}}$, під дією якого якорі починає обертатись. При цьому в обмотці якоря наводиться ЕРС $E = C_E \Phi \cdot n$, що направлена проти струму і яку називають проти-ЕРС.

При роботі двигуна розрізняють моменти:

- вказаний електромагнітний M , що розвиває двигун;
- зовнішній (гальмівний) $M_{\text{зовн}}$, який двигуну треба подолати.

При рівності моментів $M = M_{\text{зовн}}$ оберти двигуна незмінні $n = \text{const}$. При зменшенні гальмівного моменту, тобто коли $M > M_{\text{зовн}}$ оберти двигуна n зростають. При зростанні гальмівного моменту, тобто коли $M < M_{\text{зовн}}$ оберти двигуна n зменшуються.

Принцип саморегулювання двигуна постійного струму полягає в тому, що двигун буде утворювати електромагнітний момент M такої величини, щоб компенсувати зовнішній момент $M_{\text{зовн}}$.

Дійсно,

$$M_{\text{зовн}} \downarrow \uparrow \Rightarrow n \uparrow \downarrow \Rightarrow E = C_E \Phi n \uparrow \downarrow \Rightarrow I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} \downarrow \uparrow \Rightarrow M = C_M \Phi I_{\text{я}} \downarrow \uparrow$$

до урівноваження $M_{\text{зовн}}$.

9.7. Пуск двигуна постійного струму

Пуск починається при $n = 0$. Це означає, що на початку пуску $E = 0$, а $I_{\text{пуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$.

При прямому пускові, коли $U = U_{\text{ном}}$, $I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}}} = (5 \dots 7) I_{\text{ном}}$.

Суттєво навантажується електрична мережа, а при затягуванні пуску надмірно нагрівається обмотка якоря. Тому прямий пуск допускається для двигунів потужністю не більше 1–2 кВт.

Для двигунів більшої потужності застосовується *реостатний пуск* або *пуск за пониженою напругою*.

При реостатному пускові послідовно з якорем включається реостат з максимальним опором $R_{\text{ря}}$. Відповідно пусковий струм зменшується до

$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{ря}}}$. У міру розкручування якоря виникає й збільшується ЕРС

якоря, опір реостата зменшується до нуля, струм якоря стає

$$I_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - E}{R_{\text{я}}}.$$

Пуск за пониженою напругою надає можливість зменшувати пусковий струм. Спочатку пуск відбувається більш повільно, але з появою і збільшенням ЕРС якоря напругу можна підняти до номінальної.

9.8. Регулювання обертів двигуна

Враховуючи те, що $E = C_E \Phi n$, з рівняння електричної рівноваги для двигуна: $U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}}$ – можна отримати $n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_E \Phi}$ (9.13), а якщо

ввести в якірне коло регулювальний реостат $R_{\text{ря}}$, то

$$n = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{ря}}) I_{\text{я}}}{C_E \Phi}. \quad (9.14)$$

Відповідно до отриманої формули оберти двигуна n можна регулювати трьома способами.

Зміною напруги. Цей спосіб широко застосовують у пристроях «генератор-двигун», де двигун живиться від спеціального генератора. Регулюючи струм збудження генератора, змінюють напругу, яка підводиться до двигуна. При зменшенні напруги U частота обертання n також зменшується.

Реостатне регулювання. При збільшенні опору реостата $R_{ря}$ чисельнику у формулі (9.14) зменшується, а це означає, відповідно, що оберти знижуються. Цей спосіб є неекономічним, оскільки на регульовальному реостаті виділяються великі теплові втрати $I_{я}^2 R_{ря}$, спричинені великим струмом $I_{я}$. Ці втрати можна порівняти з потужністю двигуна.

Зміною магнітного потоку Φ . Зміна магнітного потоку здійснюється введенням регульовального реостата $R_{рз}$ у коло обмотки збудження (рис. 9.5). Змінюючи незначний струм збудження ($I_з \approx (3...5)\% I_{я}$), змінюємо й магнітний потік. Таким чином, при збільшенні опору цього реостата зменшується струм збудження та створюваний ним магнітний потік, і, як витікає з формули (9.13), оберти двигуна збільшуються

$$R_{рз} \uparrow \Rightarrow I_з \downarrow \Rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow n \uparrow.$$

Це основний спосіб регулювання. Але при значному зменшенні струму збудження оберти сильно зростають, і механічно двигун може пошкодитись. Тому його забезпечують автоматичним захистом, який відмикає двигун від мережі постійної напруги при сильному зменшенні струму збудження.

9.9. Робочі характеристики двигунів постійного струму

Властивості та характеристики двигунів постійного струму суттєво залежать від способу їх збудження. На практиці застосовують двигуни з паралельним (незалежним) збудженням, з послідовним і змішаним збудженням. Їх характеристики суттєво відрізняються.

9.9.1. Двигун з паралельним збудженням

В двигуні з паралельним збудженням (рис. 9.13, а) зі збільшенням корисної потужності на валу P_2 струм збудження I_3 не змінюється, якщо не враховувати реакцію якоря, і магнітний потік Φ залишається незмінним. Враховуючи залежність (9.1):

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}} = k_1 I_{\text{я}},$$

можна зробити висновок, що електромагнітний момент двигунів паралельного і незалежного збудження (до насичення магнітопроводу) пропорційний струму якоря (рис. 9.13, б). На графіках показаний I_0 – струм неробочого ходу. Оскільки $I_{\text{я}} \sim P_2$, то зі зростанням навантаження зростає й струм якоря. Враховуючи залежність $M = \frac{P_2}{\omega}$, де ω – кутова частота

обертання, отримуємо аналогічну залежність моменту від навантаження.

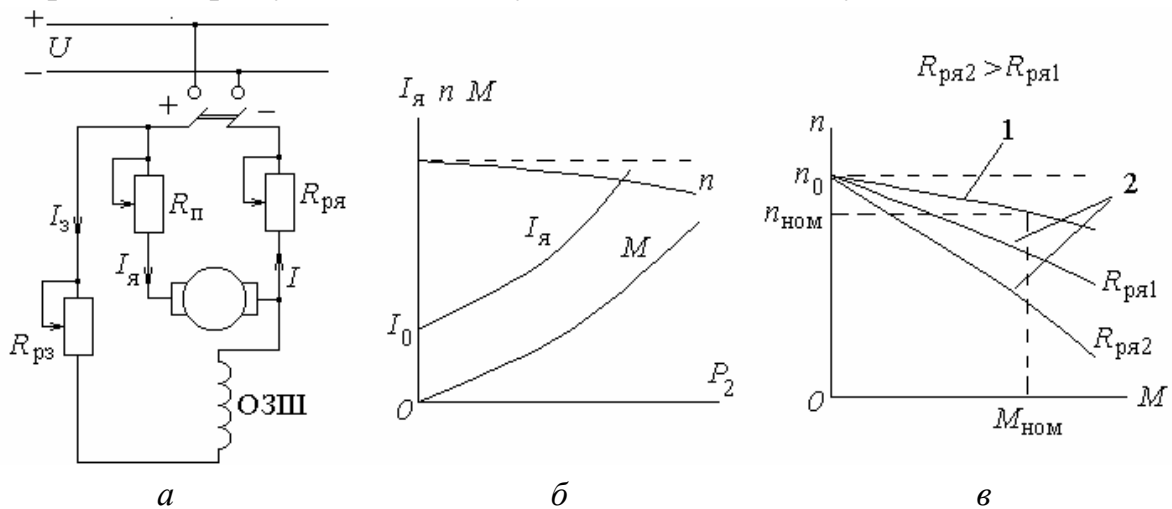


Рисунок 9.13

Механічна характеристика $n(M)$ при $I_3 = \text{const}$. Формулу (9.13) можна перетворити наступним чином:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E \Phi} = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E \Phi} = n_0 - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E \Phi}, \quad (9.15)$$

де $n_0 = \frac{U}{C_E \Phi}$ – частота обертання в режимі НХ (без навантаження).

Але момент $M = C_M \Phi \cdot I_{\text{я}}$, звідси $I_{\text{я}} = \frac{M}{C_M \Phi}$ після підстановки у

(9.15) отримуємо рівняння природної механічної характеристики двигуна (крива 1 на рис. 9.13, в):

$$n = n_0 - \frac{M \cdot R_{\text{я}}}{C_E C_M \Phi^2}. \quad (9.16)$$

При введенні опору $R_{\text{ря}}$ у якірне коло отримуємо штучні механічні характеристики (криві 2 на рис. 9.13, в):

$$n = n_0 - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{ря}})}{C_E C_M \Phi^2}. \quad (9.17)$$

Природна механічна характеристика цього двигуна постійного струму жорстка: при змінюванні навантаження частота обертання змінюється мало. При номінальному навантаженні зміна частоти обертання становить (5–10) % від n_0 .

9.9.2. Двигун з послідовним збудженням

Особливістю двигуна постійного струму з послідовним збудженням (рис. 9.14, а) є те, що струм якоря дорівнює струму збудження $I_{\text{я}} = I_{\text{з}}$. Таким чином, при зміні навантаження струм збудження не може залишатись постійним.

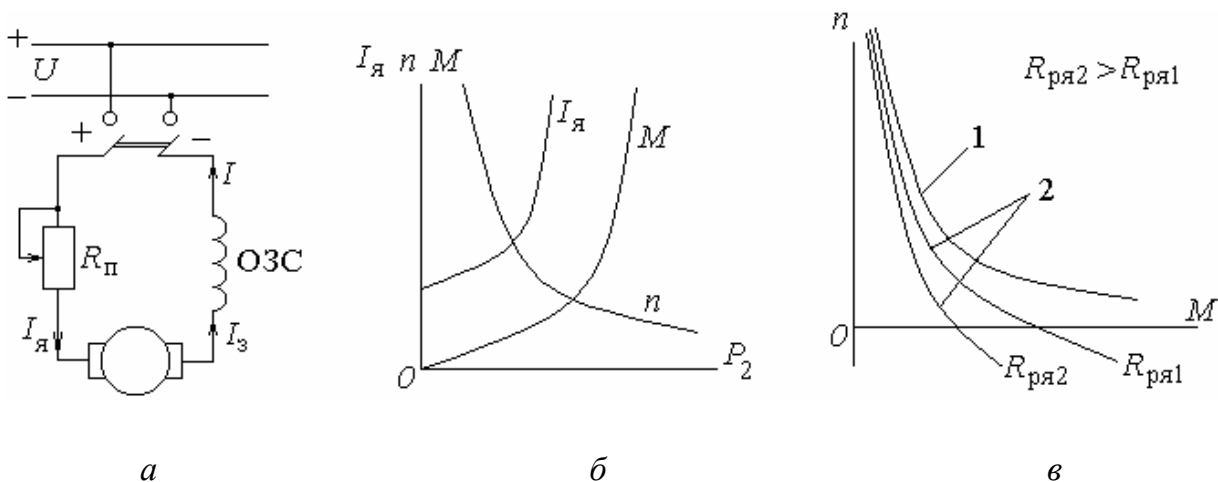


Рисунок 9.14

Тобто зміна навантаження призводить до зміни магнітного потоку. Коли магнітна система машини ненасичена, то магнітний потік пропорційний струму якоря $\Phi \sim I_3 = I_{\text{я}}$, тобто

$$\Phi = k_{\Phi} I_{\text{я}}. \quad (9.18)$$

Але момент $M = C_M \Phi \cdot I_{\text{я}}$, відтак після підстановки (9.18) отримуємо залежність:

$$M = C_M k_{\Phi} \cdot I_{\text{я}}^2. \quad (9.19)$$

Цей двигун здатен утворювати великі моменти та витримувати значні перевантаження (рис. 9.14, б). Оскільки зі зростанням навантаження зростає струм якоря та магнітний потік, то оберти змінюються у широкому діапазоні.

Механічна характеристика $n(M)$.

З формули $M = C_M k_{\Phi} \cdot I_{\text{я}}^2$, отримуємо струм якоря:

$$I_{\text{я}} = \sqrt{\frac{M}{C_M k_{\Phi}}}. \quad (9.20)$$

Оскільки магнітний потік пропорційний струму якоря $\Phi = k_{\Phi} I_{\text{я}}$, то

$$\Phi = k_{\Phi} \sqrt{\frac{M}{C_M k_{\Phi}}} = \sqrt{\frac{M \cdot k_{\Phi}}{C_M}}. \quad (9.21)$$

Підставляючи у вихідну формулу (9.13) для обертів формули (9.18) і (9.21), отримуємо природну механічну характеристику (крива 1 на рис. 9.14, в):

$$\begin{aligned} n &= \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E \Phi} = \frac{U}{C_E \sqrt{M \frac{k_{\Phi}}{C_M}}} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E k_{\Phi} I_{\text{я}}} = \\ &= \frac{U}{C_E \sqrt{M \frac{k_{\Phi}}{C_M}}} - \frac{R_{\text{я}}}{C_E k_{\Phi}} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B \end{aligned}, \quad (9.22)$$

де A і B – постійні величини.

Формула (9.22) – це рівняння гіперболи. Тобто, частота обертання двигуна з послідовним збудженням зі збільшенням електромагнітного

моменту зменшується за законом, близьким до гіперболічного. Уповільнення спаду природної механічної характеристики в нижній частині обумовлено магнітним насиченням магнітопроводу і падінням напруги на якорі.

Регулювання частоти обертання за допомогою пускорегулювального реостата $R_{р\text{я}}$, хоч і застосовується, але неекономічне, так як пов'язано зі значними втратами енергії. Сімейство штучних механічних характеристик показано на рис. 9.14, в (криві 2).

Але при зменшенні навантаження на валу двигуна різко зростає частота обертання. Теоретично – до нескінченності. Двигун «іде у рознос». Холостий хід для цього двигуна неприпустимий. Тому двигун з послідовним збудженням повинен бути жорстко з'єднаний з робочим механізмом за допомогою зубчатої передачі, муфти та ін., а не малонадійної ремінної передачі.

Двигуни послідовного збудження широко застосовуються на електротранспорті (тягові двигуни) і в підйомних установках (кранові двигуни), де потрібен великий обертовий момент, особливо при пуску.

9.9.3. Двигун зі змішаним збудженням

У двигуна зі змішаним збудженням (рис. 9.15, а) основною є обмотка збудження паралельна ОЗШ, а послідовна обмотка ОЗС є допоміжною.

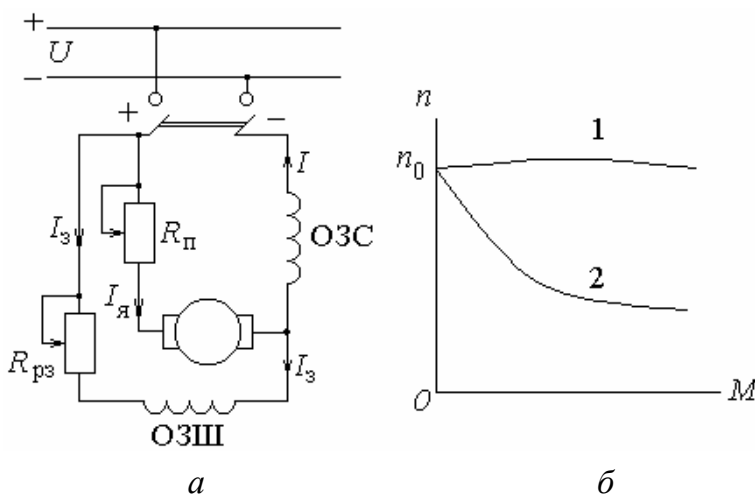


Рисунок 9.15

Послідовна обмотка може вмикатися згідно або зустрічно відносно паралельної, тобто її магнітний потік додається або віднімається до основної паралельної. При зустрічному вмиканні – потоки віднімаються і механічна характеристика «більш жорстка», ніж у двигуна

з паралельним збудженням (крива 1 на рис. 9.15, б), тобто частота обертання майже не змінюється від навантаження.

При згідному вмиканні – потоки додаються і двигун має властивості як двигуна з паралельним, так і двигуна з послідовним збудженням (крива 2 на рис. 9.15, б). Але при малих навантаженнях та навіть при неробочому ході такий двигун має обмежену частоту обертання.

Двигуни змішаного збудження застосовуються в установках, де потрібен великий пусковий момент і робота при малих моментах навантаження з можливістю регулювання частоти обертання в широких межах, наприклад, в приводах насосів, компресорів, станків та в електротязі.

Вітчизняні та закордонні заводи випускають багато типів машин постійного струму як загально промислового, так і спеціалізованого призначення (рис. 9.16).

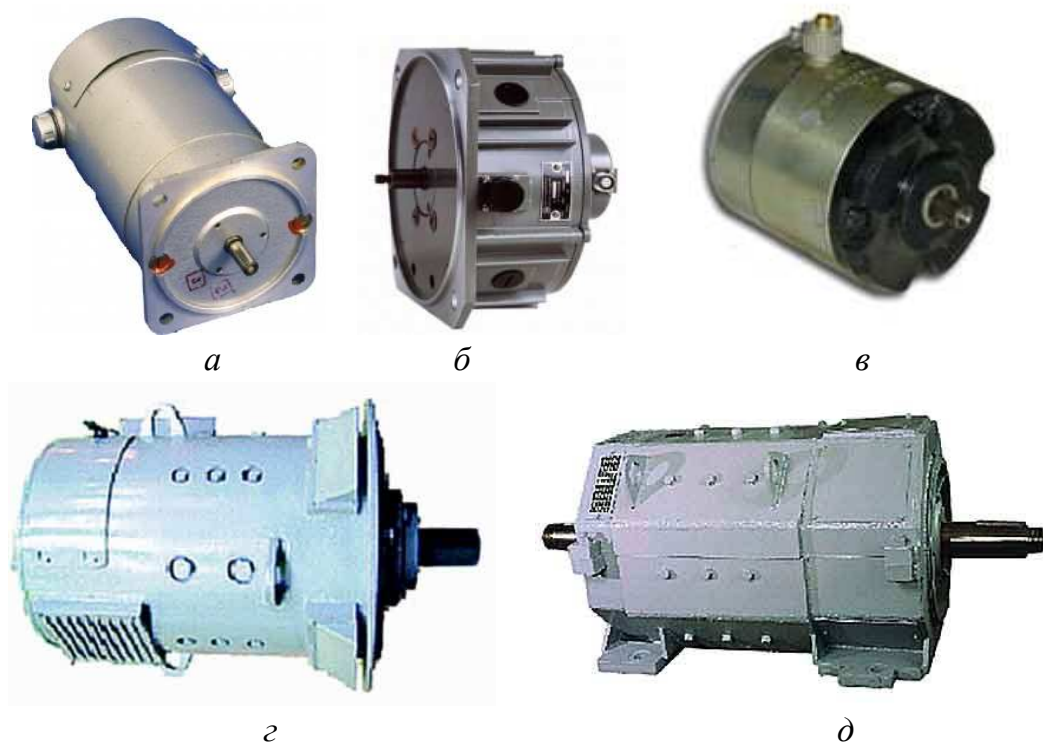


Рисунок 9.16

На рис. 9.16, а показаний двигун постійного струму КПК-562У2 незалежного збудження, який використовується для приводів зварювальних автоматів, напівавтоматів та інших механізмів. Його потужність 60 Вт, напруга якоря та збудження – 48 В, струм якоря 2,1 А, струм збу-

дження 0,2 А, ККД – 54 %. Двигун забезпечує частоту обертання 5000 об/хв.

На рис. 9.16, б показаний малоінерційний двигун постійного струму ДПУ 240-1100 незалежного збудження з плоским якорем та високою швидкістю, який призначений для приводів мехатронних модулів, станків з ЧПУ та промислових роботів. Його потужність 1,1 кВт, напруга живлення 122 В, споживаний струм 11 А. При масі 15 кг він забезпечує номінальний момент 3,5 Н·м і частоту обертання 3000 об/хв.

На рис. 9.16, в показаний двигун постійного струму МВ-42 послідовного збудження, призначений для привода вентилятора. Його потужність 175 Вт, напруга живлення 27 В постійного або змінного струму. При масі 4,7 кг він забезпечує номінальний момент 0,48 Н·м і частоту обертання 3500 об/хв.

На рис. 9.16, г показаний двигун постійного струму ДПБ 80 незалежного збудження потужністю 80 кВт. Він живиться від напруги 400 В та споживає струм 220 А. При масі 925 кг він обертається з частотою 1650 об/хв, і забезпечує номінальний момент 520 Н·м, а максимальний 1127 Н·м.

На рис. 9.16, д показаний двигун постійного струму ДПЕ 200-2 незалежного збудження потужністю 200 кВт. При напрузі живлення 440 В він споживає струм 490 А. Його маса 2885 кг, габаритні розміри 1962x810x824 мм³, частота обертання 1600 об/хв.

Запитання для самоконтролю

1. Як побудована машина постійного струму?
2. Поясніть призначення основних її елементів?
3. Як створюється ЕРС в обмотці якоря машини постійного струму і якою загальною формулою визначається?
4. Як створюється електромагнітний момент машини постійного струму і якою загальною формулою визначається?
5. Поясніть принцип дії генератора постійного струму.
6. Поясніть принцип дії двигуна постійного струму.
7. Запишіть формули рівноваги ЕРС та напруг для якірного кола генератора та двигуна постійного струму.
8. Як визначаються корисна та витрачена потужності машини постійного струму у режимі генератора та двигуна.
9. Які втрати потужності виникають у машинах постійного струму?
10. Які способи збудження застосовують у машинах постійного струму?
11. Як здійснюється самозбудження генератора постійного струму з паралельним збудженням?
12. У чому полягає проблема пуску двигуна постійного струму і якими способами вирішується ця проблема?
13. У чому полягає властивість саморегулювання двигуна постійного струму?
14. Як регулюється частота обертання двигуна постійного струму?
15. Порівняйте природні механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного та послідовного збудження?

Розділ 10

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Отримання обертового магнітного поля в електричній машині змінного струму досягається завдяки тому, що кути між магнітними осями фазних котушок у статорі дорівнюють або кратні кутам фазних зсувів між струмами в цих котушках.

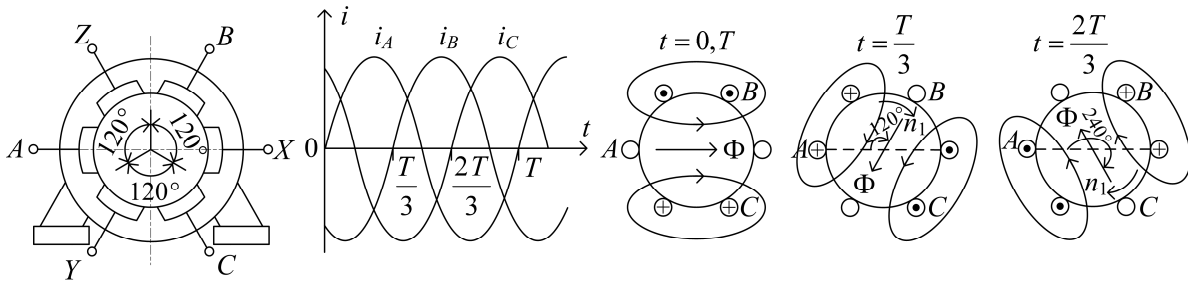


Рисунок 10.1

Найпростіше обертове магнітне поле утворюється за допомогою трифазної системи струмів i_A, i_B, i_C , які подаються у фазні обмотки статора, розташовані через 120° . За один період струму T магнітний потік зробить один оберт. Таким чином, кількість обертів магнітного поля за секунду буде дорівнювати частоті змінного струму: $n_1 = f_1$. Це відповідає

числу пар полюсів $p = 1$.

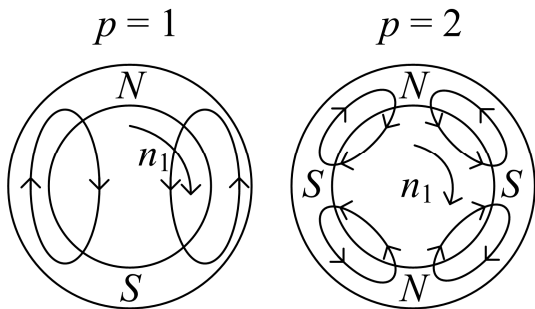


Рисунок 10.2

Якщо фазні обмотки розташовані через 60° , то за один період змінного струму магнітний потік пройде тільки півкожухності, тобто зробить півоберт, що подає $n_1 = \frac{f_1}{2}$. Це відповідає числу пар полюсів $p = 2$.

У загальному випадку $n_1 = \frac{f_1}{p}$. Для електричних мереж з частотою $f_1 = 50$ Гц (такі мережі в Україні) у табл. 10.1 дані оберти магнітного поля в статорах електричних машин змінного струму для різного числа пар полюсів.

Таблиця 10.1

p	1	2	3	4	5	6
n_1 , об/с	50	25	16,7	12,5	10	8,33
n_1 , об/хв	3000	1500	1000	750	600	500

Конструкція статора електричної машини змінного струму, призначеного для створення обертового магнітного поля, зберігає загальну структуру незалежно від того, яка це електрична машина: асинхронна чи синхронна.

У корпусі статора розташовується осердя, набране зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. З внутрішнього боку осердя утворюються пази, в які закладається трифазна обмотка статора з ізолюваного мідного проводу. Кінці кожної фазної котушки виведені на клемну коробку.

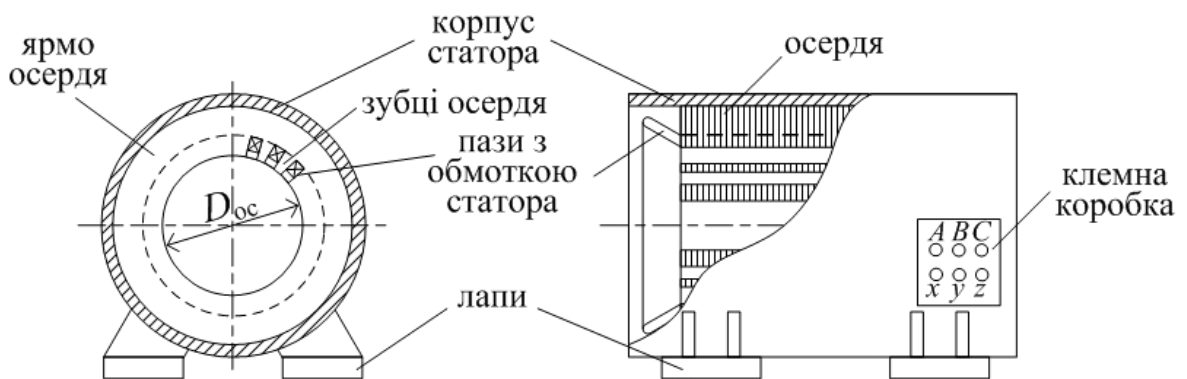


Рисунок 10.3

Відстані між осями пари полюсів осердя статора відповідає полюсне ділення $\tau = \frac{\pi D_{oc}}{2p}$, де D_{oc} – внутрішній діаметр осердя статора.

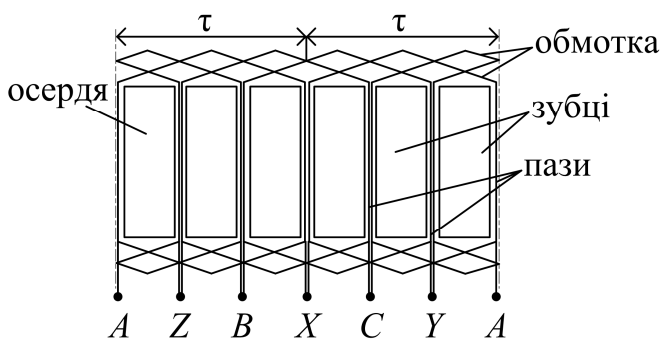


Рисунок 10.4

дять кінці валу ротора, оперті на підшипники.

Якщо розгорнути циліндричну внутрішню поверхню осердя статора для пари полюсів, то добре видно як укладені фазні котушки. Картина повторюється при $p = 2, 3$ і т.д.

З торців статор закривається щитами, крізь які проходять кінці валу ротора, оперті на підшипники.

10.1. Асинхронні електричні машини

Принцип дії.

Розглянемо, як взаємодіє обертове магнітне поле з рамкою із провідникового матеріалу, розташованою в розточці осердя статора.

При перетинанні цієї рамки магнітним потоком Φ_m за правилом

правої руки в рамці наведеться ЕРС E_{2s} і виникне струм $I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}}$,

де R_2 , X_{2s} – резистивний та індуктивний опори рамки.

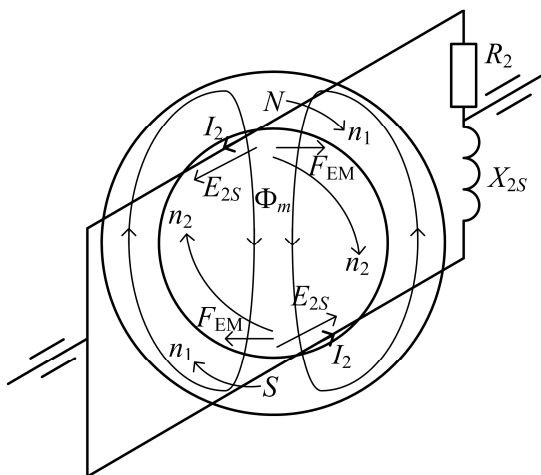


Рисунок 10.5

Відповідно до правила лівої руки до рамки прикладуться електромагнітні сили F_{EM} , які будуть обертати рамку в напрямку обертання магнітного потоку Φ_m .

Якщо швидкість обертання рамки n_2 зрівняється зі швидкістю обертання магнітного потоку n_1 , ЕРС E_{2s} зникне, через те що по відношенню до обертового магнітного поля

рамка стане нерухомою. Вона почне гальмуватися, знову з'явиться різниця обертів n_1 і n_2 , а це поновить ЕРС E_{2s} . Таким чином, працездатність

рамки залежить від коефіцієнта ковзання $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$. При $s = 0$ обертовий момент буде відсутній.

При розташуванні площини рамки перпендикулярно до магнітного потоку Φ_m електромагнітні сили F_{EM} зникнуть, але якщо таких рамок, з'єднаних між собою, буде кілька і розташовані вони будуть у різних площинах, то завжди якісь з них будуть створювати електромагнітний момент.

Частота зміни магнітного поля по відношенню до осердя статора $f_1 = p n_1$, а по відношенню до рамки, що належить роторові, $f_2 = p(n_1 - n_2) = \frac{n_1 - n_2}{n_1} p n_1 = s f_1$. При $s = 1$ ($n_2 = 0$, ротор нерухомий) $f_2 = f_1$. Відповідно загальмовані ЕРС E_2 і індуктивний опір X_2 будуть такими:

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{o62} \Phi_m,$$

де w_2 – число витків обмотки ротора; k_{o62} – обмотковий коефіцієнт ротора;

$$X_2 = 2\pi f_1 L_2,$$

де L_2 – індуктивність обмотки ротора.

Враховуючи те, що $f_2 = s f_1$, отримуємо $E_{2s} = s E_2$, $X_{2s} = s X_2$.

Обертовий магнітний потік Φ_m проходить як крізь обмотку ротора, так і крізь обмотку статора, наводячи в останній ЕРС:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{o61} \Phi_m,$$

де w_1 – число витків обмотки статора; k_{o61} – обмотковий коефіцієнт статора.

Можна вважати, що $E_1 \cong U_1$ – напрузі живлення асинхронного двигуна. Коефіцієнт трансформації від обмотки статора до нерухомої обмотки ротора $k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{o61}}{w_2 k_{o62}}$, а це надає $E_2 \cong \frac{U_1}{k_e}$.

Відповідно, $E_{2s} = \frac{sU_1}{k_e}$, а струм в обмотці ротора:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}} = \frac{sU_1}{k_e \sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}}.$$

10.2. Типи роторів асинхронного двигуна

Найбільш поширені *короткозамкнені* ротори, в яких струм проходить по стрижням, що закорочені між собою. Стрижні розташовані в осерді ротора, набраного з листової електротехнічної сталі товщиною 2 мм (рис. 10.6). Крізь осердя проходить магнітний потік з частотою перемагнічування $f_2 = s f_1$ на рівні 2–3 Гц (в асинхронних двигунах $s_{\text{ном}} = 0,03\text{--}0,05$). Тому втрати потужності в осерді ротора практично відсутні.

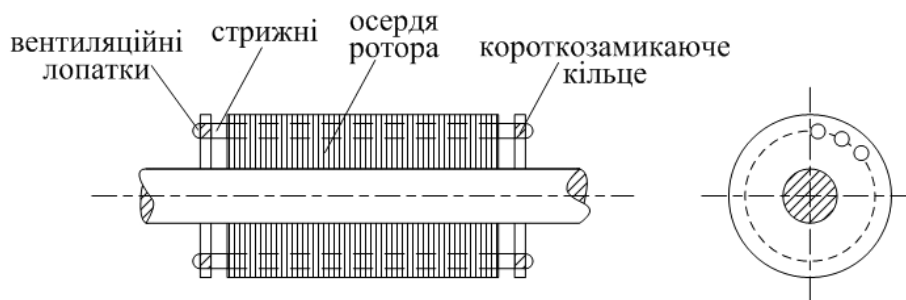


Рисунок 10.6

Застосовується й інший тип обмотки ротора – котушкова трифазна

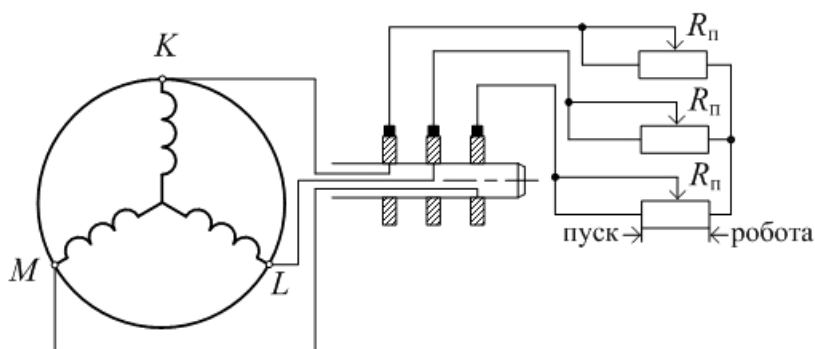


Рисунок 10.7

обмотка, яка подібна тій, що й на статорі. Вона закладається пофазно в пази на поверхні осердя ротора, а кінці фазних котушок, з'єднаних «зіркою», виводяться на контактні кільця (рис. 10.7).

Такий тип ротора називається *фазним*. Через щітки на контактних кільцях він з'єднується з пусковим реостатом, який збільшує опір у колі ротора при пуску. А при виході на робочий режим реостат шунтується, закорочуючи обмотку ротора.

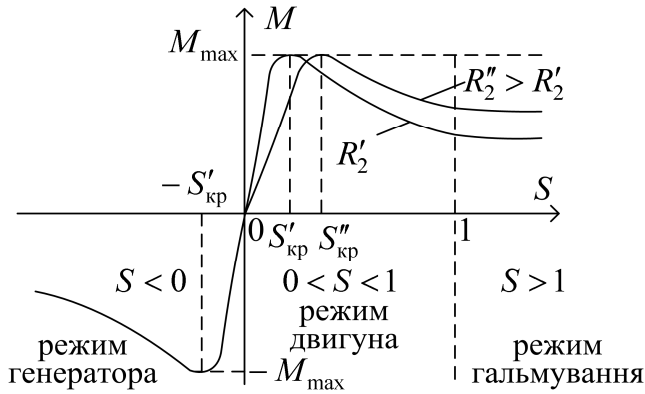


Рисунок 10.8

Кількість пар полюсів ротора відповідає кількості пар полюсів статора. Основні параметри двох типів роторів дані в таблиці, де m_2 – число фаз обмотки ротора; N – число стрижнів; m_1 – число фаз обмотки статора.

Таблиця 10.2

Параметр	Короткозамкнений ротор	Фазний ротор
w_2	1/2	будь-яке
$k_{об2}$	1	0,9–0,95
m_2	N	m_1

10.3. Енергетична діаграма асинхронного двигуна

На шляху перетворення електричної енергії P_E в механічну $P_{МЕХ}$ відбуваються втрати потужності в статорі (електричні в обмотці $\Delta P_{E1} = m_1 R_1 I_1^2$ і магнітні в осерді ΔP_{M1}) і в роторі (рис. 10.9).

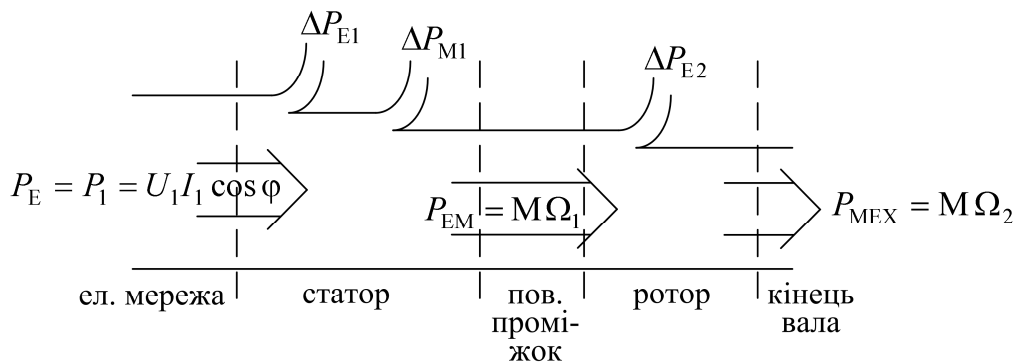


Рисунок 10.9

Магнітні втрати в роторі практично відсутні і є тільки електричні $\Delta P_{E2} = m_2 R_2 I_2^2$. Ці втрати визначають різницю P_{EM} і $P_{MEХ}$, тобто, з іншого боку, $\Delta P_{E2} = P_{EM} - P_{MEХ} = M \Omega_1 - M \Omega_2 = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} M \Omega_1 = s M \Omega_1 = s P_{EM}$.

Таким чином, можна записати, враховуючи, що $I_2 = \frac{s U_1}{k_e \sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}}$,

наступне $s M \Omega_1 = m_2 R_2 \frac{s^2 U_1^2}{k_e^2 (R_2^2 + s^2 X_2^2)}$, де $\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$.

Звідси $M = C_M \frac{s R_2 U_1^2}{R_2^2 + s^2 X_2^2}$, де $C_M = \frac{p m_2}{2\pi f_1 k_e^2}$.

Максимальне значення електромагнітного моменту M відповідає умові $\frac{dM}{ds} = 0$, що подає $M_{\max} = \pm C_M \frac{U_1^2}{2X_2}$ при $s_{\text{кр}} = \pm \frac{R_2}{X_2}$. Збільшення R_2 не змінює M_{\max} , але збільшує $s_{\text{кр}}$.

Для визначення електромагнітного моменту зручно користуватися формулою Клосса:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}$$

Крім електромагнітного моменту енергетична діаграма надає можливість проаналізувати залежність від коефіцієнта ковзання s ККД асинхронного двигуна $\eta = \eta_2 \eta_1$, де η_2 – ККД ротора; η_1 – ККД статора. Останній безпосередньо не залежить від s , тому достатньо розглянути $\eta_2 = \frac{P_{EM} - \Delta P_{E2}}{P_{EM}} = \frac{P_{EM} - s P_{EM}}{P_{EM}} = 1 - s$.

Таким чином, ККД асинхронного двигуна $\eta = \eta_1(1 - s)$. Збільшення ковзання зменшує ККД.

Механічна характеристика асинхронного двигуна це залежність $n_2(M)$ за умови $U_1 = \text{const}$; $f_1 = \text{const}$.

Характеристика має стійку (ab) і не стійку (bc) ділянки.

На ділянці ab при зміні зовнішнього моменту в межах $0 < M_{\text{зовн}} < M_{\text{max}}$ оберти двигуна змінюються в межах $n_1 > n_2 > n_{\text{кр}}$, що супроводжується зміною електромагнітного моменту M , який урівноважує зовнішній момент. Якщо зовнішній момент сягає M_{max} , то подальше зменшення обертів на ділянці bc не збільшує, а зменшує електромагнітний момент і він не може урівноважити зовнішній момент. Двигун зупиняється.

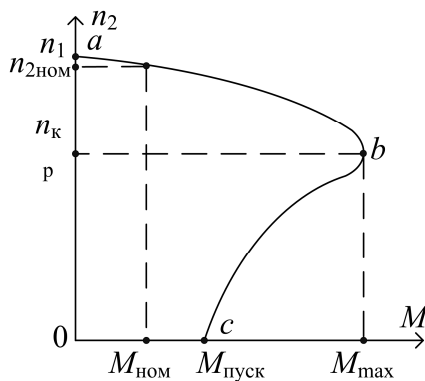


Рисунок 10.10

Характерними параметрами механічної

характеристики є: $\lambda_M = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} = 2 \dots 2,8$;

$\lambda_{\Pi} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = 1 \dots 1,8$ (для короткозамкнених роторів).

Робочі характеристики АД це залежності n_2 , M , I_1 , $\cos \varphi$, η від P_2 за умови: $U_1 = \text{const}$; $f_1 = \text{const}$.

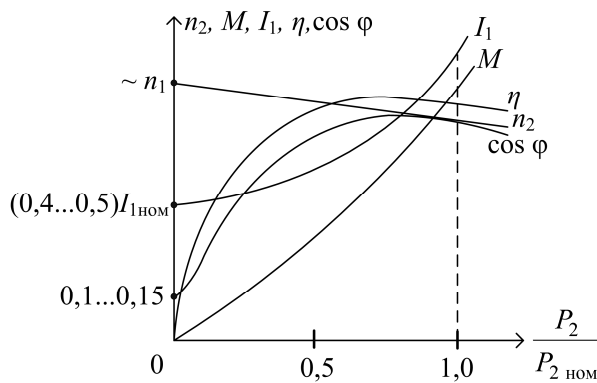


Рисунок 10.11

Максимальні значення $\cos \varphi$ і ККД знаходять в зоні $(0,7 \dots 0,8) \frac{P_2}{P_{2\text{ном}}}$, де P_2 – потужність на валу.

Для більшості асинхронних двигунів $\cos \varphi_{\text{max}} = 0,9 \dots 0,95$; $\eta_{\text{max}} = 0,85 \dots 0,95$. У неробочому режимі $\cos \varphi$ зменшується до 0,1–

0,15, що обумовлює відносно великий струм споживання (до 0,5 від номінального) при повній відсутності корисної роботи. Тому «ганяти» асинхронний двигун без навантаження не варто.

Пуск асинхронного двигуна починається з $n_2 = 0$, тобто він являє собою в цю мить свого роду трансформатор, де первинною обмоткою є обмотка статора, а вторинною – короткозамкнена обмотка ротора.

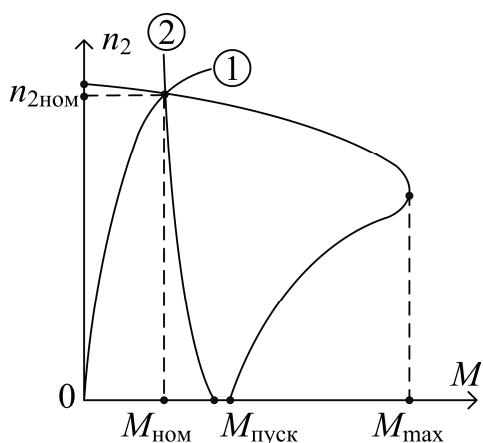


Рисунок 10.12

Таким чином, асинхронний двигун попадає в режим короткого замикання трансформатора з відповідним кидком струму до $(5...7)I_{1ном}$. Наскільки швидко він вийде з цього стану залежить від характеристики навантаження. Найбільш легкою є так звана «вентиляторна» або «насосна» характеристика 1, протидіючий момент якої близький до нуля при $n_2 = 0$. Складніше ситуація з

«транспортною» характеристикою 2, коли при $n_2 = 0$ вже є момент опору, як правило, більший за $M_{ном}$. Цей момент треба подолати, і якщо $M_{пуск}$ асинхронного двигуна буде менший, то пуск взагалі неможливий.

Тому пуск при вентиляторному навантаженні вважається легким, а при транспортному – важким. У першому випадку використовуються асинхронні двигуни зі звичайними короткозамкненими роторами, в другому – асинхронні двигуни зі спеціальними короткозамкненими або фазними роторами, які забезпечують пуск при $M_{пуск} = M_{max}$.

При вентиляторній характеристиці навантаження і потужності асинхронного двигуна до 1–2 кВт допускається так званий «прямий» пуск.

При великій потужності для зменшення пускового струму викорис-

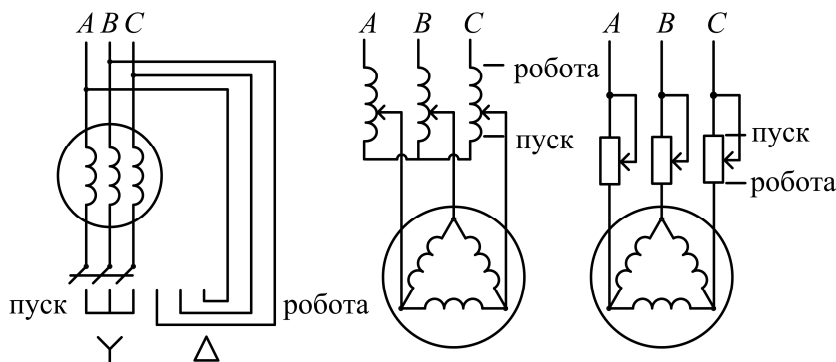


Рисунок 10.13

товується пуск при зниженій напрузі. Це досягається або з'єднанням фазних обмоток статора «зіркою» під час пуску, що подає зменшення фазної напруги і пусково-

го струму в $\sqrt{3}$ разів, або використанням пускового автотрансформатора, пускового реостата.

При важкому пускові зменшення пускового струму й збільшення пускового моменту до M_{\max} можливе за допомогою фазного ротора.

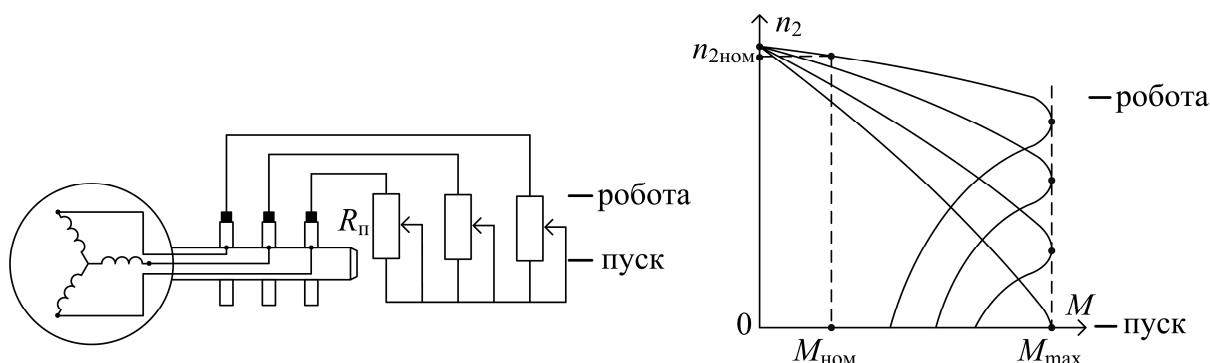


Рисунок 10.14

Додаючи опір пускового реостата $R_{\text{п}}$ до активного опору ротора R_2 , з одного боку, можна зменшувати пусковий струм, через те що зменшується струм ротора $I_2 = \frac{U_1}{k_e \sqrt{(R_2 + R_{\text{п}})^2 + X_2^2}}$, з іншого боку, можна збільшити $M_{\text{пуск}}$ до M_{\max} , якщо $R_{\text{п}} = X_2 - R_2$. Цьому відповідає $s_{\text{кр}} = \frac{R_2 + R_{\text{п}}}{X_2} = 1$ і $M_{\text{пуск}} = M_{\max}$ при $n_2 = 0$. Зменшуючи $R_{\text{п}}$ по мірі збільшення обертів n_2 можна проводити пуск, підтримуючи весь час максимальний момент на валу.

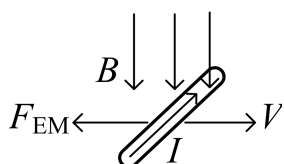


Рисунок 10.15

Зменшуючи $R_{\text{п}}$ по мірі збільшення обертів n_2 можна проводити пуск, підтримуючи весь час максимальний момент на валу.

Гальмування асинхронного двигуна можливе двома способами.

Найбільш простий – шляхом перемикання двох фаз. Магнітне поле статора починає обертатися в протилежному напрямі – назустріч обертанню ротора – і гальмує його.

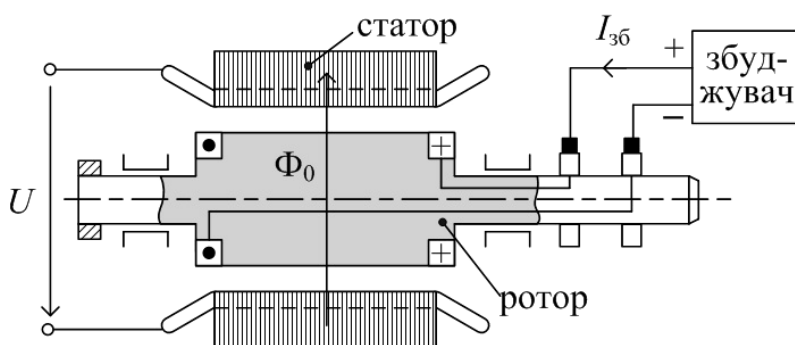


Рисунок 10.16

Другий спосіб – це відключення обмотки статора від змінного струму і підключення однієї з фаз до постійного струму.

У нерухомому магнітному полі відповідно до правил правої і лівої рук в обмотці ротора наведеться електромагнітна сила F_{EM} , спрямована проти напрямку обертання ротора. Відбудеться гальмування.

10.4. Синхронні електричні машини

Електрична машина змінного струму називається *синхронною*, якщо оберти її ротора дорівнюють обертам магнітного поля статора: $n_2 = n_1$.

Досягається це завдяки тому, що в обмотку ротора подається струм $I_{3\phi}$ від стороннього джерела електричної енергії, яке називається *збуджувачем*. Цей струм, протікаючи в обмотці ротора, створює магнітний потік Φ_0 , який обертається разом з ротором.

При появі струму в обмотці статора і, відповідно, обертового магнітного поля статора, останнє зчіплюється з магнітним потоком Φ_0 ротора, і вони синхронно обертаються разом з однаковим числом обертів $n_2 = n_1$.

Незалежно від того є струм чи ні в обмотці статора, магнітний потік ротора наводить в обмотці статора ЕРС:

$$E_0 = 4,44 f_1 w_1 k_{o61} \Phi_0.$$

У синхронних мікромашинах магнітний потік Φ_0 утворюється постійними магнітами, розташованими на роторі.

Діапазон потужностей синхронних електричних машин дуже широкий: від кількох ват (мікромашини) до тисячі й більше МВт (турбогенератори, гідрогенератори, надпотужні двигуни). У залежності від числа обертів ротори великих синхронних електричних машин бувають двох видів:

- неявнополюсні, якщо $n_2 > 1000$ об/хв;
- явнополюсні, якщо $n_2 \leq 1000$ об/хв.

Неявнополюсні ротори виготовляються з цілісної феромагнітної поковки, на зовнішній частині якої профрезеровані пази. У пази закладається сідлоподібна обмотка з мідного проводу, кінці якої з'єднуються з контактними кільцями. У пазовій частині обмотка утримується клинними, а в

лобовій – бандажними кільцями. Для турбогенераторів маса таких роторів сягає сотні тон.

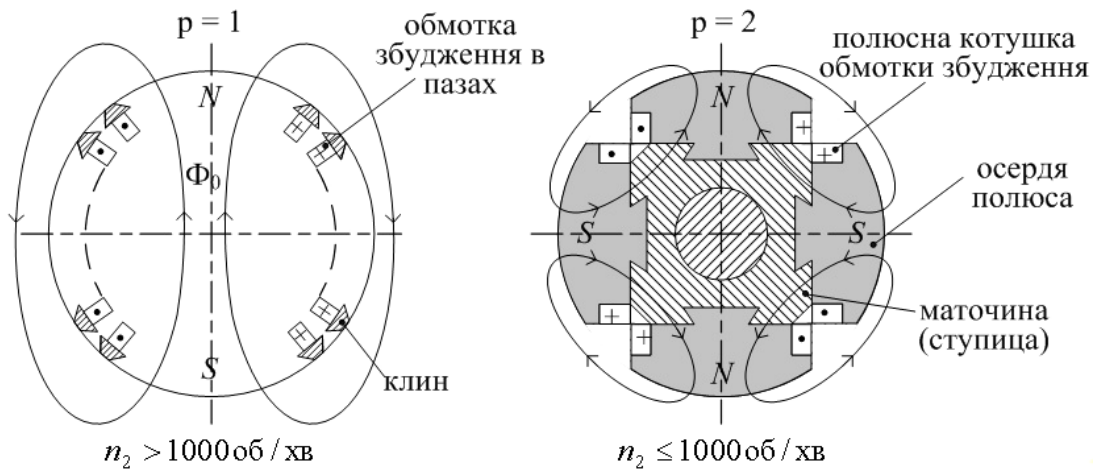


Рисунок 10.17

Явнополюсні ротори складаються з окремих полюсів, закріплених на маточині (ступиці). Кожен полюс має своє осердя з розташованою на ньому котушкою збудження з ізолюваного мідного проводу. З'єднані між собою паралельно або послідовно ці котушки приєднуються до контактних кілець. Число пар полюсів у таких роторах може сягати кількох десятків (наприклад, у гідрогенераторах), а загальна маса ротора – сотні тон.

Спрощена схема заміщення синхронної електричної машини, яку можна вважати джерелом ЕРС E_0 , що наводиться магнітним потоком ротора Φ_0 в обмотці статора, яка підключена до електричної мережі з напругою U_1 (рис. 10.18). При цьому ця синхронна машина може працювати як у режимі генератора (Г), так і в режимі двигуна (Д).

Резистивний опір обмотки статора R_1 в синхронній електричній

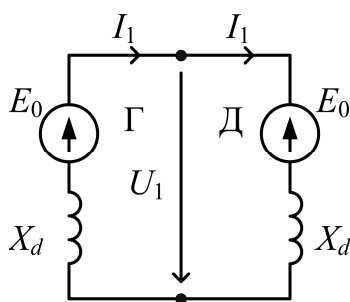


Рисунок 10.18

машині набагато менший за індуктивний опір X_d , який складається з основного, пов'язаного з магнітним потоком ротора Φ_0 , і додаткового, від потоків розсіяння навколо обмотки статора Φ_1 . У наслідок того, що $R_1 \ll X_d$, R_1 можна не вводити в рівняння електричної рівноваги синхронної машини, яке буде мати вигляд:

– для генераторного режиму $\underline{U}_1 = \underline{E}_0 - jX_d \underline{I}_1$;

– для двигунного режиму $\underline{U}_1 = \underline{E}_0 + jX_d \underline{I}_1$.

Відповідні спрощені векторні діаграми з прив'язкою до силової взаємодії магнітних полів ротора й статора будуть такими (див. рис. 10.19).

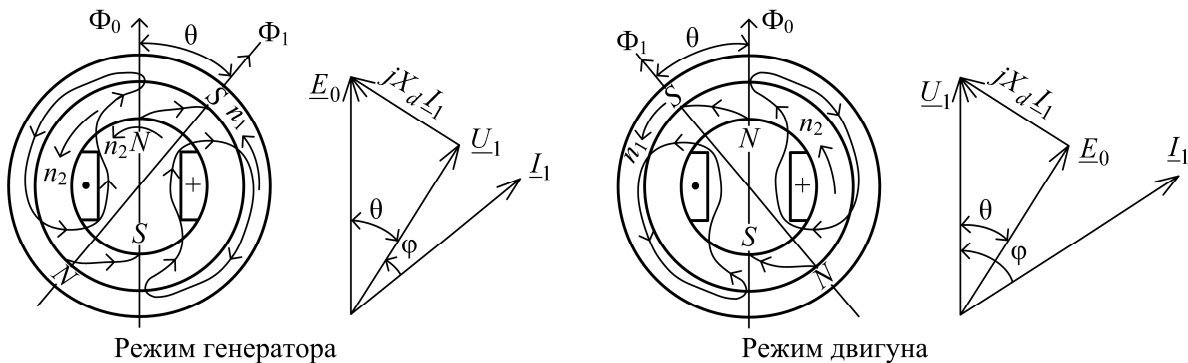


Рисунок 10.19

Синхронна електрична машина може працювати також у режимі *синхронного компенсатора*. Особливість цього режиму полягає в тому, що ротор не з чим ні з'єднаний, тобто механічна енергія не передається. У той же час, синхронна машина підключена до електричної мережі з напругою U_1 , в обмотці статора проходить струм I_1 . Такій ситуації відповідає $P = U_1 I_1 \cos \varphi = 0$, що можливо тільки за умови $\varphi = \pm 90^\circ$. При цьому $\underline{U}_1 = \underline{E}_0 + jX_d \underline{I}_1$, а кут $\theta = 0^\circ$. Тобто магнітні осі обертового магнітного поля статора та ротора спрямовані зустрічно, їх полюси притягуються один до одного й міцно утримуються взаємно нерухожими із-за відсутності зовнішнього моменту.

Якщо в ротор не подається струм збудження ($I_{зб} = 0$), в обмотці статора не наводиться ЕРС E_0 і вона являє собою котушку з індуктивним опором X_d , увімкнуту на напругу U_1 . Цьому відповідає $I_{1\max} = \frac{U_1}{X_d}$. У міру того, як збільшується струм збудження, зменшується струм в обмотці статора $I_1 = \frac{U_1 - E_0}{X_d}$ і при $U_1 = E_0$ стає рівним нулю. При подальшому збільшенні струму збудження струм в обмотці статора змінює свій на-

прям, і синхронний компенсатор переходить в ємнісний режим (рис. 10.20).

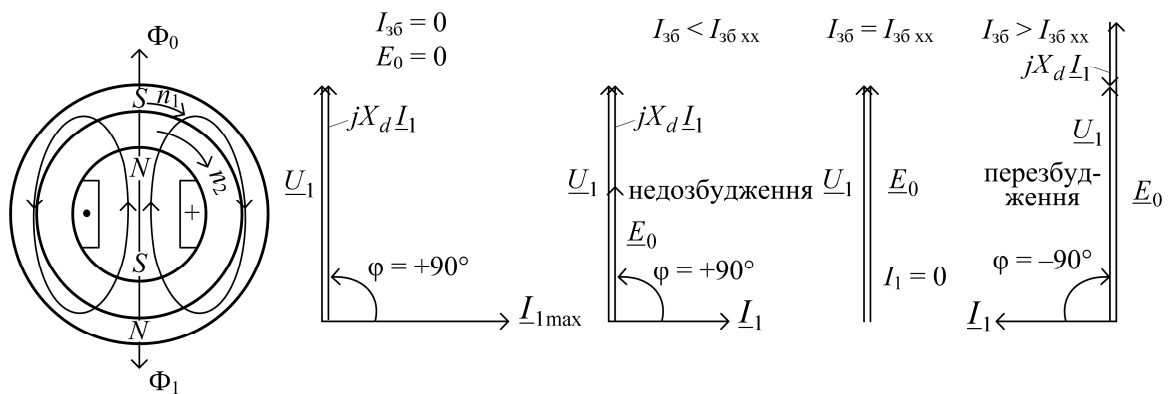


Рисунок 10.20

Таким чином, при паралельній роботі з електричною мережею синхронний компенсатор може покращувати її загальний $\cos \varphi$.

Кутова характеристика синхронної машини подає залежність P , M від кута θ за умови $U_1 = \text{const}$; $I_{36} = \text{const}$.

З векторної діаграми отримуємо $X_d I_1 \cos \varphi = E_0 \sin \theta$, тобто $I_1 \cos \varphi = \frac{E_0}{X_d} \sin \theta$. Відповідно залежність активної потужності й моменту від кута θ (рис. 10.21) буде мати вигляд: $P = U_1 I_1 \cos \varphi = P_{\max} \sin \theta$, де

$$P_{\max} = \frac{U_1 E_0}{X_d}; M = \frac{P}{\Omega_2} = M_{\max} \sin \theta, \text{ де } M_{\max} = \frac{U_1 E_0}{2\pi n_2 X_d}.$$

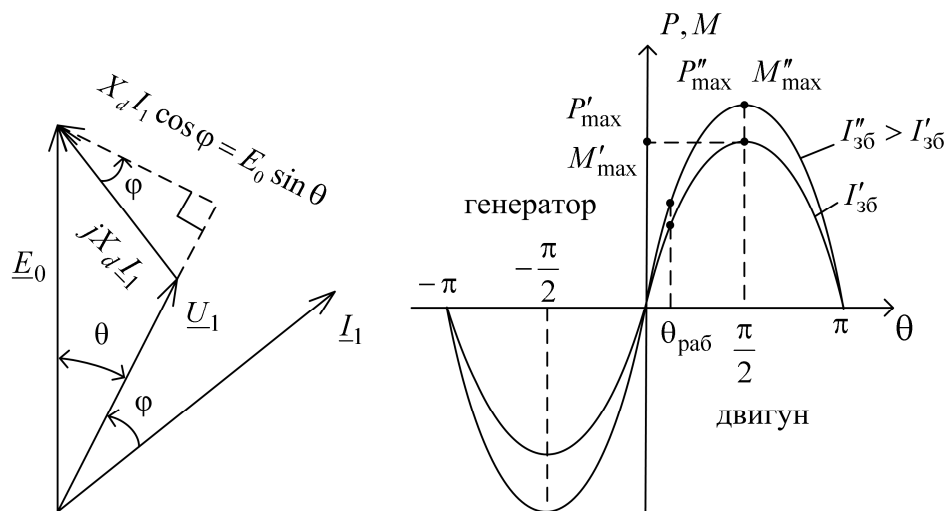


Рисунок 10.21

До кута $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ характеристика має стійкий характер, тобто збільшенню кута θ відповідає збільшення моменту M . Після досягнення куту $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ при подальшому його збільшенні момент падає, стійкість втрачається і синхронна машина або зупиняється (двигун), або іде в «рознос» (генератор) і потребує аварійної зупинки.

Стійкість синхронної машини підвищується при збільшенні струму збудження.

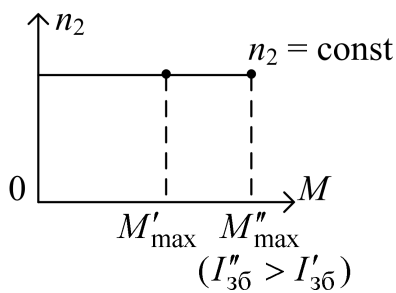


Рисунок 10.22

Механічна характеристика синхронного двигуна $n_2(M)$ за умови $U_1 = \text{const}$; $I_{3б} = \text{const}$ витікає з кутової характеристики.

Її особливістю є те, що до досягнення M_{max} зовнішній момент не зменшує оберти двигуна, які залишаються незмінними до втрати стійкості (рис. 10.22).

Як вже відзначалося, стійкість синхронного двигуна можна підвищувати за допомогою струму збудження.

Запитання для самоконтролю

1. Зобразіть конструкцію трифазного асинхронного двигуна?
2. Які основні типи виконання обмотки ротора трифазного асинхронного двигуна?
3. Як створюється обертове магнітне поле в трифазному асинхронному двигуні?
4. У чому полягає принцип дії трифазного асинхронного двигуна?
5. Що називається ковзанням асинхронної машини?
6. Яким чином створюється електромагнітний момент у трифазному асинхронному двигуні і від яких параметрів він залежить?
7. Як визначаються корисна та витрачена потужності трифазного асинхронного двигуна?
8. Які витрати потужності виникають в асинхронному двигуні при його роботі?
9. Зобразіть механічну характеристику асинхронного двигуна і зазначте на ній точки, які відповідають неробочому ходу, пуску, номінальному режиму та максимальному навантаженню.
10. Вкажіть на механічній характеристиці асинхронного двигуна ділянки, які відповідають стійкій та нестійкій роботі двигуна.
11. Як змінюється механічна характеристика трифазного асинхронного двигуна при зміні напруги живильної мережі, а також при введенні додаткового опору в фази обмотки ротора?
12. У чому полягає проблема пуску трифазного асинхронного двигуна?
13. Які способи пуску використовуються для асинхронних двигунів з короткозамкненим і фазним роторами?
14. Якими способами можна регулювати частоту обертання ротора двигуна з короткозамкненим і фазним роторами?
15. Яким способом змінюється напрямок обертання ротора трифазного асинхронного двигуна?
16. Поясніть будову синхронної машини і призначення її елементів.
17. У якій якості використовують синхронні машини?

Розділ 11

ЕЛЕКТРОНІКА

Електроніка – це галузь науки й техніки, що базується на загальних законах і поняттях електротехніки та вивчає фізичні явища, пов’язані з пересуванням заряджених часток (переважно електронів) у вакуумі, газі, кристалічних структурах, а також будову і характеристики приладів, пристроїв і систем, побудованих на основі цих фізичних явищ.

Таким чином, розрізняють *фізичну електроніку* і *технічну електроніку*.

Основні функціональні напрями останньої:

- *інформаційна електроніка*, яка охоплює зв’язок, електронно-обчислювальну та електронно-вимірювальну техніку, різного виду системи керування;
- *енергетична електроніка*, яка використовується при перетворенні потоків електричної енергії середньої й великої потужності;
- *медична електроніка*, що пов’язана з системами діагностики та лікування;
- *електронна технологія*, спрямована на здійснювання технологічних процесів, в основі яких лежить використання електромагнітних хвиль, електронних та іонних пучків.

Сучасні електронні прилади, які використовуються в технічній електроніці, можуть бути на струми від 10^{-18} А до 10^4 А, реагувати на напруги від 10^{-14} В до 10^4 В, споживати потужність від 10^{-25} Вт до 10^3 Вт.

Більш ніж 90 % електронних приладів напівпровідникові.

Клас напівпровідникового приладу визначає напруга, яку він може витримувати:

до 100 В – 1-й клас;

до 200 В – 2-й клас;

.....

.....

до 4000 В – 40-й клас – самий високий на сьогодні.

11.1. Напівпровідникові матеріали

Ознакою належності речовини до класу напівпровідників можна вважати рівень провідності, який відповідно до питомого опору знаходиться посередині між провідниками й діелектриками:

– для провідників $\rho = 10^{-8} \dots 10^{-6}$ Ом · м;

– для напівпровідників $\rho = 10^{-2} \dots 10^6$ Ом · м;

– для діелектриків $\rho > 10^{12}$ Ом · м.

Найбільш поширені серед напівпровідників кремній Si (до 90 %) та германій Ge, що належать до IV валентної групи, а також цілий ряд сполук типу оксидів міді Cu_2O і цинку ZnO , арсеніду галію GaAs, карбіду кремнію SiC та ін.

Характерною особливістю напівпровідникових матеріалів є те, що їх провідність суттєво залежить від зовнішніх факторів (температури, електричного поля, освітлення, механічного навантаження та ін.).

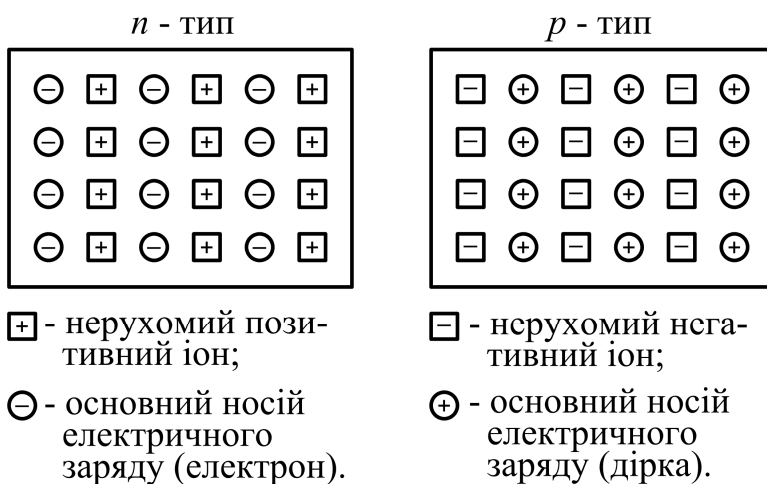
Особливо впливає присутність у напівпровіднику домішок, які суттєво змінюють не тільки значення, а й характер провідності. Навіть невелика домішка (до 10 атомів на 10^6 атомів напівпровідника) наближає його провідність до провідності металів.

Домішки, які сприяють збільшенню в напівпровіднику електронів, називають *донорними*, а ті, що сприяють збільшенню дірок (рухомих позитивних зарядів, які утворюються з атомів напівпровідника внаслідок втрати електрона із зовнішньої орбіти) – *акцепторними*.

Донорними будуть домішки V валентної групи (наприклад, фосфор P) по відношенню до напівпровідника IV валентної групи (на-

приклад, кремнію Si). Утворюється напівпровідник *n-типу*, у якому основними носіями електричних зарядів стають електрони, а домішкові атоми, що втратили електрон, стають нерухомими позитивними іонами. Незначна кількість дірок залишається в якості неосновних носіїв електричних зарядів. Тому, у спрощеній структурі напівпровідника їх можна не показувати.

Акцепторними будуть домішки III валентної групи (наприклад, індій In) по відношенню до напівпровідника IV валентної групи. Утворюється напівпровідник *p-типу*, у якому основними носіями електричних



зарядів стають дірки, а домішкові атоми, що приєднали електрон, стають нерухомими негативними іонами. Незначна кількість електронів залишається в якості неосновних носіїв електричних зарядів (рис. 11.1).

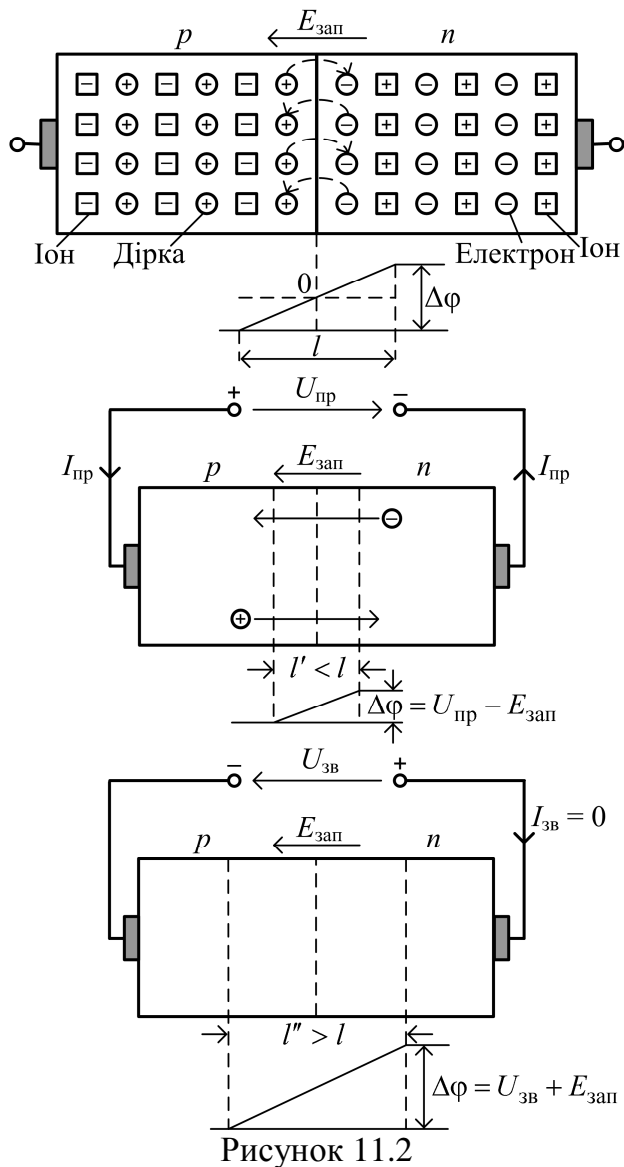
Рисунок 11.1

p-n перехід у на-

півпровідникові виникає при з'єднанні напівпровідників *n*- і *p*-типу. Наприклад, він утворюється в пластині кремнію, якщо з одного її боку вводити донорну домішку, а з іншого – акцепторну.

У місці контакту напівпровідників різного типу відбувається взаємна дифузія й активна рекомбінація основних носіїв електричних зарядів – електронів і дірок. Внаслідок цього в контактній зоні залишаються нерухомі позитивні й негативні іони, між якими виникає запираюче електричне поле $E_{зап}$ (*потенційний бар'єр* $\Delta\phi$), спрямоване проти напрямку руху основних носіїв електричних зарядів.

Якщо до *p-n* переходу підключити пряму напругу $U_{пр}$ («+» на *p*, «-» на *n*), то вона буде діяти проти запираючого електричного поля $E_{зап}$ і зменшувати потенційний бар'єр. Основні носії електричних зарядів почнуть рухатися, утвориться прямий струм $I_{пр}$ (рис. 11.2).



При зворотному підключенні напруги $U_{зв}$ (« \leftarrow » на p , « \rightarrow » на n), вона додається до запираючого електричного поля $E_{зап}$, потенційний бар'єр збільшується і струм не проходить, якщо p - n перехід ідеальний (вважаємо, що неосновні носії електричних зарядів відсутні).

Таким чином, p - n перехід являє собою якісно новий вид нелінійного опору, значення якого, перш за все, залежить від полярності прикладеної напруги. За однієї полярності (пряме включення) його опір малий і близький до нуля (утворюється начебто замкнуте електричне коло). За іншій полярності (зворотне включення) його опір великий – на рівні діелектриків, і можна вважати, що в цьому місці електричне коло є розірваним.

11.2. Напівпровідникові прилади

Усі базові напівпровідникові прилади умовно можна поділити на дві основні групи: *резистори*, що створюють більший чи менший опір на шляху електричного струму, і *вентилі*, які, використовуючи властивості p - n переходу, можуть пропускати або не пропускати електричний струм.

До останніх відносяться *діоди*, *транзистори* і *тиристори*.

Принцип дії, характеристики й способи включення базових напівпровідникових приладів суттєво не змінюються при їх об'єднанні в інтег-

ральні мікросхеми. Вони також становлять основу всієї електронно-логічної схемотехніки.

11.2.1. Напівпровідникові резистори

До них відносяться: лінійні резистори, варистори, термістори, тензорезистори, фоторезистори (рис. 11.3).

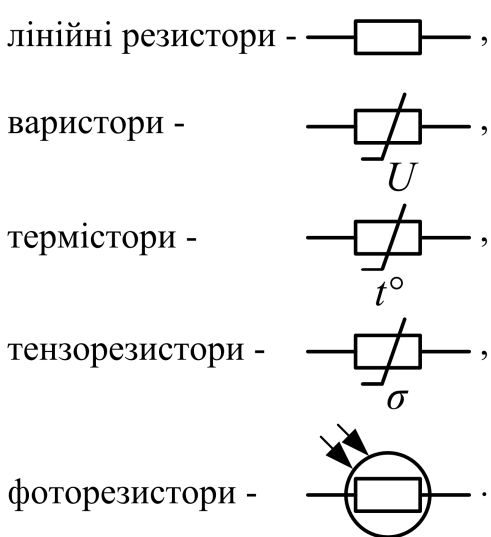


Рисунок 11.3

Усі ці електричні опори з двома виводами, виготовлені з рівномірно легова-них напівпровідникових матеріалів.

Лінійний резистор практично не змінює свій опір у широкому діапазоні напруг й струмів. Такі резистори поширені в інтегральних мікросхемах.

Варистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги, його вольт-амперна характеристика нелінійна й симетрична відносно початку координат (рис. 11.4).

Головний параметр – це коефіцієнт нелінійності:

$$\lambda = \frac{R}{R_d} = \frac{U/I}{dU/dI},$$

де R , R_d – статичний і динамічний опори варистора;

U , I – напруга й струм.

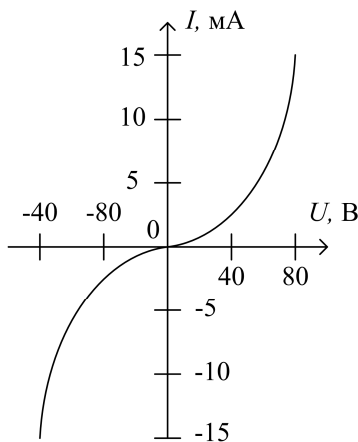


Рисунок 11.4

Коефіцієнт нелінійності варисторів знаходиться в діапазоні 2–6, що дозволяє використовувати їх для захисту приладів і елементів електричних схем від перенапруги, стабілізації та регулювання напруги й струму.

Терморезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого істотно залежить від температури. Розрізняють два види терморезисторів: *термістор 1*, опір якого різко

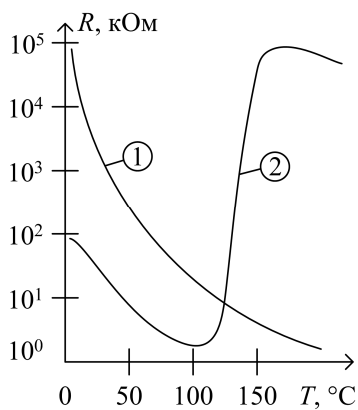


Рисунок 11.5

зменшується при збільшенні температури, і *позистор* 2, опір якого різко збільшується при досягненні певного рівня температури (робоча ділянка характеристики див. рис. 11.5).

Характеризує роботу терморезистора температурний коефіцієнт:

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} \cdot 100 \% / ^\circ\text{C},$$

що показує відсоткову зміну опору при зміні температури.

Для термісторів $\alpha = -(3...7) \% / ^\circ\text{C}$; для позисторів $\alpha = (10...50) \% / ^\circ\text{C}$.

Використовуються термістори в системах вимірювання й регулювання температури, теплового захисту, протипожежної сигналізації.

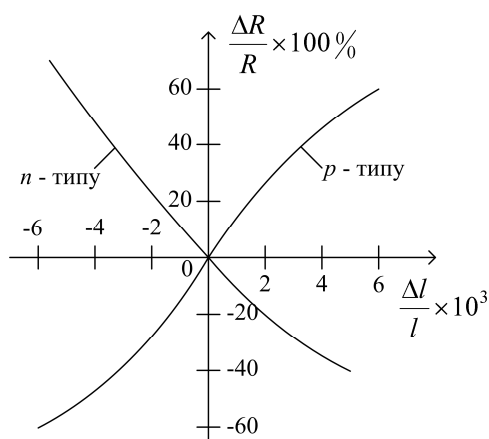


Рисунок 11.6

Тензорезистор – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від його механічної деформації. Закріплений належним чином на деталях різного роду машин і механізмів тензорезистор дозволяє вимірювати деформацію цих деталей і визначати за допомогою закону Гука механічні напруги в них.

Найважливішою для тензорезисторів є їхня деформаційна характеристика, яка показує залежність відносного опору тензорезистора $\Delta R/R$ від його відносної деформації $\Delta l/l$, де l – довжина тензорезистора (рис. 11.6).

Коефіцієнт тензочутливості $K_\sigma = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$ знаходиться у діапазоні від -150 до $+150$.

Фоторезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого змінюється залежно від параметрів освітлення (рис. 11.7).

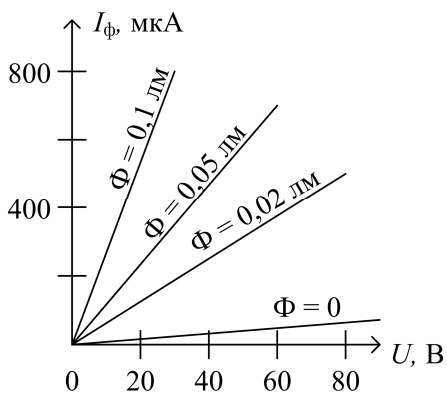


Рисунок 11.7

Основна характеристика фоторезистора це вольт-амперна характеристика, що показує, як зі збільшенням освітлення зростає струм. Загальна чутливість фоторезистора $S = I_{\phi} / \Phi$ може досягати 20 А/лм.

11.2.2. Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковим діодом називається електронний прилад з двома виводами, між якими розташований кристал з одним $p-n$ переходом.

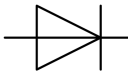
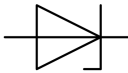
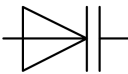

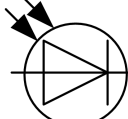
- випрямні діоди -		Для виготовлення напівпровідникових діодів найчастіше використовують кремній (до 150°С) або германій (до 85°С).
- стабілітрони -		
- варикапи -		Основні види напівпровідникових діодів: випрямні діоди, стабілітрони, варикапи, світло діоди, фотодіоди (рис. 11.8).
- світлодіоди -		
- фотодіоди -		

Рисунок 11.8

Випрямний діод призначений для випрямлення змінного струму, його робота заснована на здатності $p-n$ переходу пропускати струм практично тільки в одному напрямку. Це відповідає так званому *прямому включенню* діода, коли на аноді А «+», а на катоді К «-». Відповідно за іншої полярності буде *зворотне включення*.

Основною характеристикою напівпровідникового діода є вольт-амперна характеристика. У германієвих діодів 1 пряме падіння напруги менше порівняно з кремнієвими 2, тобто менше теплова потужність, яка виділяється в діоді й гріє його. Але зворотні параметри кращі в кремнієвих діодів: менший зворотний струм і більша зворотна напруга, яку діод може витримувати (рис. 11.9).

Для зменшення нагрівання потужних діодів застосовують більш ефективні способи їх охолодження: монтаж на радіаторах, обдування та ін.

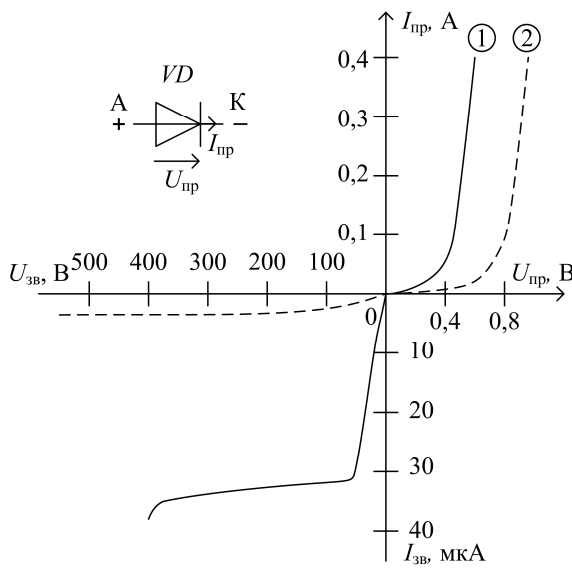


Рисунок 11.9

Якщо до діода прикласти велику пряму напругу $U_{пр}$, то виникне неприпустимо великий прямий струм $I_{пр}$ і за декілька секунд діод розжариться та зруйнується. Але при одноразовому короткочасному включенні (до 0,1 с) цього не станеться, діод зможе витримати 50–100-кратне перевантаження.

При включенні напівпровідникового діода на зворотну напругу $U_{зв}$ надмірне її підвищення

може привести до лавинного пробою $p-n$ переходу і руйнуванню діода. Тому діоди надійно працюють при зворотних напругах, не вищих за 0,7–0,8 від пробивних.

Параметри діодів різного рівня потужності наведені в табл. 11.1.

Таблиця 11.1

Тип діода	Параметри		
	Допустимий прямий струм $I_{пр\ max}$, А	Допустима зворотна напруга $U_{зв\ max}$, В	Зворотний струм $I_{зв}$, мкА при $U_{зв\ max}$
Крапкові	0,01–0,1	25–150	0,1–10
Площинні:			
малопотужні	0,1–1,0	200–1000	10–200
потужні	1,0–2000	200–4000	1000–5000

Для роботи з більш високими зворотними напругами випускаються так звані *діодні стовпи*, в яких послідовно з'єднані від 5 до 50 діодів.

У тому разі, коли потрібно збільшувати не тільки зворотну напругу, а й прямий струм, використовують *силові діодні збірки*, у яких діоди з'єднуються і послідовно, і паралельно.

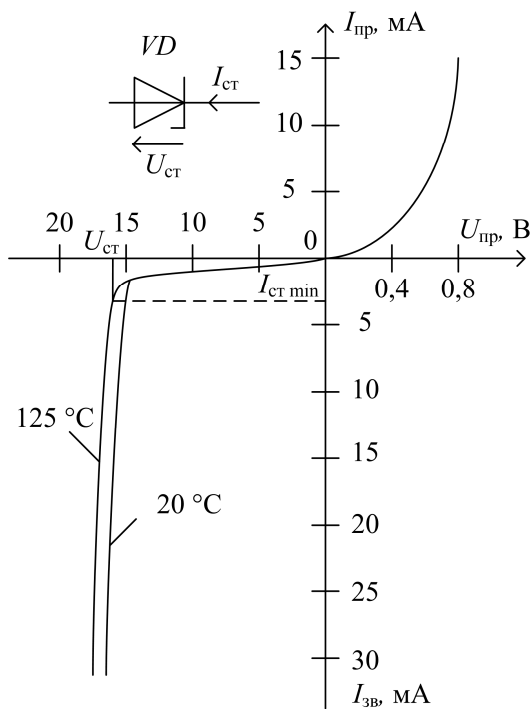


Рисунок 11.10

Напівпровідниковий стабілітрон відрізняється від випрямного діода тим, що його зворотна напруга в зоні електричного пробоя мало залежить від значення струму. Тому за його допомогою можна підтримувати стабільну напругу $U_{ст}$.

На вольт-амперній характеристиці стабілітрона (рис. 11.10) виділяються такі параметри: практично незмінна напруга $U_{ст}$; мінімальний $I_{ст\ min}$ і максимальний $I_{ст\ max}$ струми стабілізації; температурний коефіцієнт напруги на ділянці стабілізації:

$$TKU = \frac{1}{U_{ст}} \cdot \frac{dU_{ст}}{dT} \cdot 100 \% / ^\circ C.$$

Стабілітрони випускаються на $U_{ст} = 1 \dots 1000$ В за зворотними струмами на ділянці стабілізації від $I_{ст\ min} \approx 1 \dots 10$ мА до $I_{ст\ max} \approx 50 \dots 2000$ мА, тобто $\frac{I_{ст\ max}}{I_{ст\ min}} \approx 50 \dots 200$.

Температурний коефіцієнт напруги TKU для більшості стабілітронів дорівнює $(-0,05 \dots +0,2) \% / ^\circ C$, а для прецизійних стабілітронів, призначених для використання в перевірочних електровимірювальних приладах високого класу, він сягає $\pm 0,0005 \% / ^\circ C$.

Варикап – це напівпровідниковий діод, у якому ємність залежить від зворотної напруги $U_{зв}$. Тому він використовується як елемент з електрично керованою ємністю (рис. 11.11).

Основними параметрами варикапа є загальна ємність C , яка фіксується при зворотній напрузі $U_{зв} = 2 \dots 5$ В, і коефіцієнт перекриття за ємністю $K_C = C_{max} / C_{min}$. Для більшості варикапів $C = 10 \dots 500$ пФ, $K_C = 2 \dots 20$.

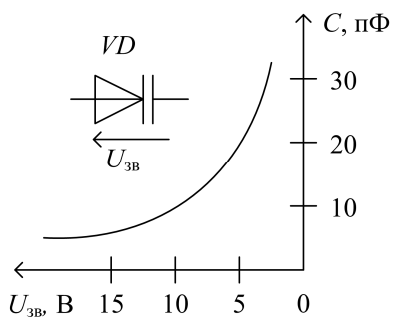


Рисунок 11.11

У фотодіоді внаслідок освітлення збільшується зворотний струм. У світлодіоді при проходженні прямого струму виникає інфрачервоне або видиме випромінювання (рис. 11.12).

Світлодіоди з інфрачервоним випромінюванням використовуються в оптоелектроніці. У видимому діапазоні застосовуються індикаторні світлодіоди (СІД), розміри кристала в яких приблизно $0,3 \times 0,3 \times 0,2 \text{ мм}^3$, а колір випромінювання може відповідати будь-якому кольору веселки.

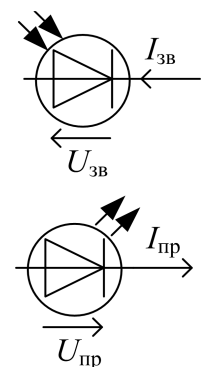


Рисунок 11.12

11.2.3. Транзистори

Транзистором називається напівпровідниковий прилад, у якому можна змінювати протікаючий струм за допомогою набагато меншого струму або електричного поля.

Залежно від способу керування струмом транзистори діляться на *біполярні, польові та IGBT*.

Біполярний транзистор складається з трьох шарів з провідністю *p*- і *n*-типів, які чергуються в напівпровідниковому кристалі. Частина кристала, найбільш насичена основними носіями електричних зарядів (електронами або дірками), називається *емітером* Е. Мало насичений зарядами того ж знаку шар називається *колектором* К. Розділяє емітер і колектор дуже вузький слабологований шар з основними носіями електричних зарядів протилежного знаку, який називається *базою* Б. Основний струм має проходити між колектором і емітером під впливом напруги U_{KE} (рис. 11.13).

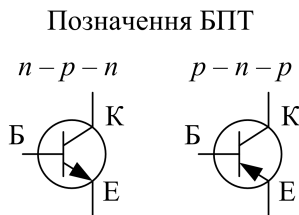
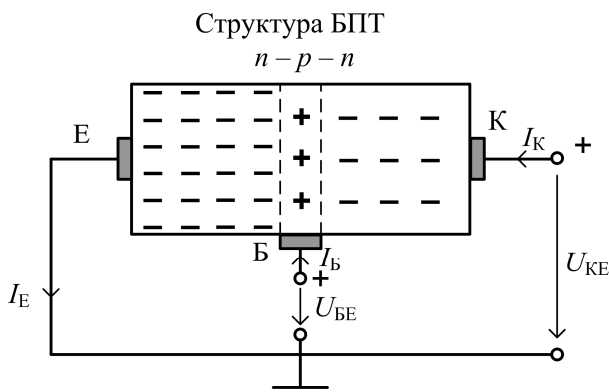


Рисунок 11.13

У активному режимі біполярний транзистор вмикається таким чином, що емітер знаходиться під прямою напругою і *p-n* перехід між ним і базою відкритий. Колектор, знаходиться під зворотною напругою, і *p-n* перехід між ним і базою закритий. Тому достатньо подати невелику пряму напругу на базу U_{BE} , щоб цей *p-n* перехід відкрився і основні носії електричних зарядів з емітера через базу пішли на колектор. Виникає струм емітера $I_E = I_K + I_B$ з коефіцієнтом пере-

дачі на колектор $\alpha = \frac{I_K}{I_E} = 0,995 \dots 0,95$.

Струм бази I_B невеликий і пов'язаний зі струмом колектора I_K таким чином $I_K = \beta I_B$, де $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cong 20 \dots 200$.

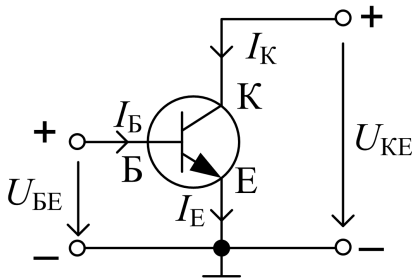


Рисунок 11.14

Можливі три схеми включення біполярного транзистора: зі *спільною базою* (СБ), зі *спільним емітером* (СЕ), зі *спільним колектором* (СК). Найчастіше вживається та, де спільним для входу й виходу є емітер (рис. 11.14). При такому включенні транзистора підсилювання вхідної напруги й струму

буде найбільшим: $K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{KE}}{U_{BE}} \gg 1$;

$$K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_K}{I_B} = \beta \gg 1.$$

Для такого включення біполярного транзистора залежність $I_B(U_{BE})$ буде вхідною характеристикою, а залежність $I_K(U_{KE})$ при $I_B = \text{const}$ –

вихідною характеристикою (рис. 11.15). Зазвичай надається набір вихідних характеристик при різних значеннях базового струму.

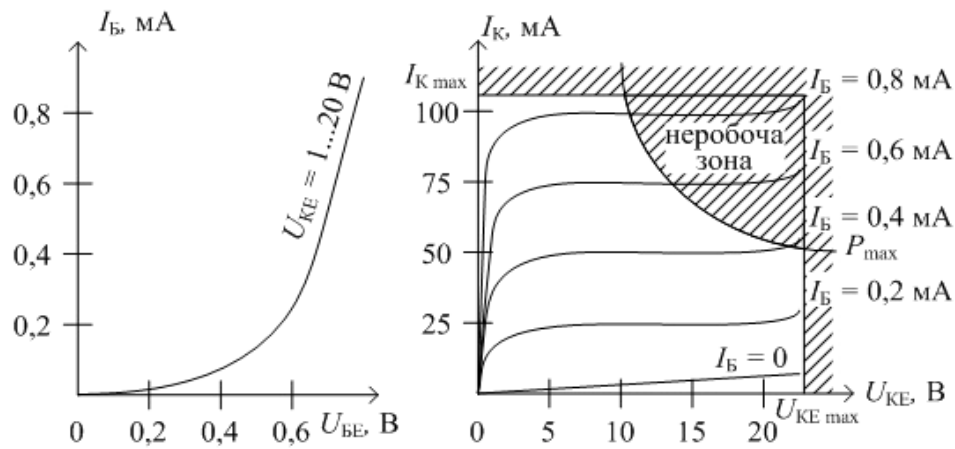


Рисунок 11.15

Робота біполярного транзистора істотно залежить від температури, яка пропорційна втратам потужності в ньому $P = U_{KE} \cdot I_K$. Тому його робоча зона обмежена максимально допустимими: потужністю втрат P_{max} , струмом I_{Kmax} (руйнація кристалічної структури), напругою U_{KEmax} (електричний пробій).

Колекторний струм помітно збільшується з підвищенням температури, що негативно впливає на роботу транзистора, тому в разі необхідності транзистор треба ефективно охолоджувати.

Підвищення частоти струму зменшує час на проходження носія електричних зарядів відстань від емітера до колектора, а це призводить до зменшення коефіцієнта передачі за струмом β . На практиці *граничною частотою* $f_{гр}$ вважається така, за якою β зменшується в $\sqrt{2}$ рази.

Класифікація й деякі параметри біполярних транзисторів наведені в табл. 11.2.

Таблиця 11.2

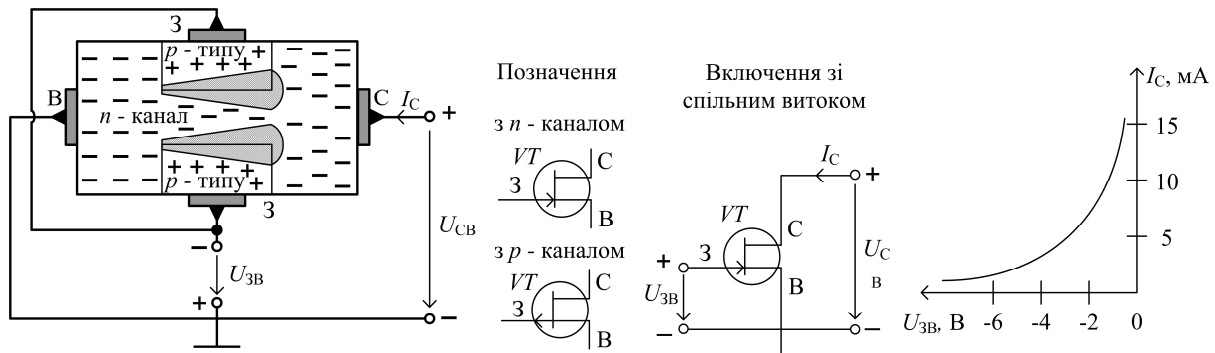
Тип транзистора	Параметри		
	U_{KEmax} , В	I_{Kmax} , А	$f_{гр}$, МГц
Малопотужні	5–25	0,01–0,3	до 8000
Середньої потужності	25–100	0,3–3,0	до 1000
Великої потужності	50–1000	0,5–10	до 300

11.2.4. Пільові транзистори

Керуються електричним полем (напругою) і поділяються на такі види:

- з керованими p - n переходами (канальні або уніполярні);
- з ізолюваним затвором;
- індукованим каналом.

Пільові транзистори з керованими p - n переходами побудовані таким чином, що між двома електродами, приєднаними до напівпровідника n - або p -типу: *стоком* (С) і *витоком* (В) – утворюється канал дуже малого перерізу, затиснутий з боків напівпровідниками протилежного типу, до яких приєднуються керуючі електроди – *затвори* (З). Якщо напруга між затвором і витоком відсутня ($U_{зв} = 0$), зони p - n переходу, в яких немає електричних зарядів, мінімальні, канал відкритий і струм I_C максимальний. У міру того, як між затвором і витоком збільшується зворотна напруга, збільшуються зони p - n переходу і зменшується струм I_C . При якомусь рівні від'ємної напруги $U_{зв}$ канал перекривається і струм I_C стає практично рівним нулю. Такий режим роботи називається *режимом збіднення*.



Недолік такого польового транзистора полягає в тому, що струм I_C можна звести до нуля тільки приклавши від'ємну напругу $U_{зв}$ і постійно її утримуючи. Тобто відсутня синхронність між керуючою напругою $U_{зв}$ і струмом I_C .

Польовий транзистор з ізолюваним затвором керується електричним полем, яке утворюється напругою $U_{зв}$, і через тонкий ізоляційний

шар проникає у провідний канал. Воно може як виштовхувати носії електричних зарядів з каналу (*збіднювати* його), так і втягувати їх в канал (*збагачувати* його). Це призводить до зменшення або збільшення струму I_C .

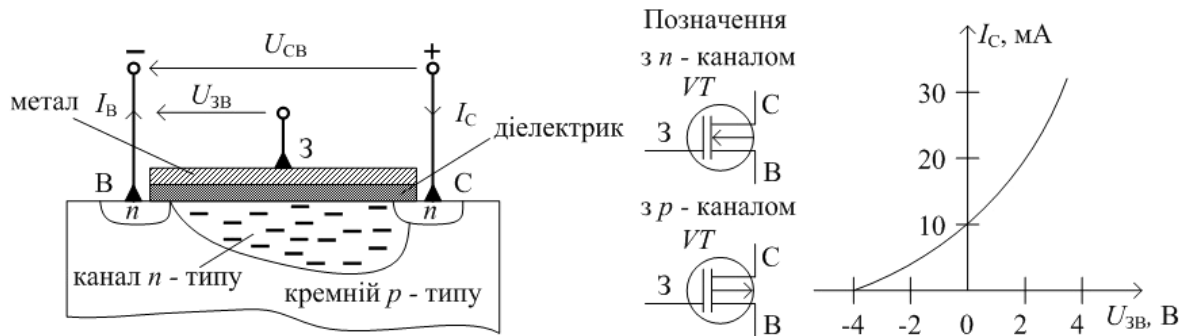


Рисунок 11.17

Польовий транзистор з індукованим каналом працює тільки в збагаченому режимі. За відсутності $U_{зв}$ канал з носіями електричних зарядів не утворюється і струм I_C не проходить. Тільки з появою напруги $U_{зв}$ в канал втягуються носії електричних зарядів і починає проходити струм I_C . Таким чином у польовому транзисторі з індукованим каналом вдається досягти синхронності між напругою $U_{зв}$ і струмом I_C .

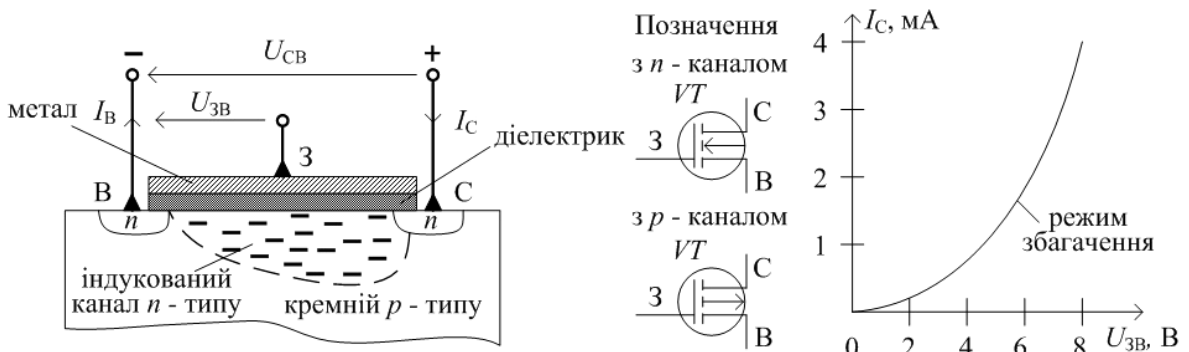


Рисунок 11.18

11.2.5. IGBT-транзистори

Польовий транзистор індукційного типу в парі з біполярним надає можливість створювати у вигляді інтегральних мікросхем монолітні транзисторні збірки, параметри яких є не нижчими за параметри потуж-

них діодів і тиристорів. Ці транзисторні збірки мають назву транзисторів типу *IGBT* (біполярні транзистори з ізольованим затвором), їхні параметри досягають за напругою – 6000 В (60-й клас), за струмом – 3000 А.

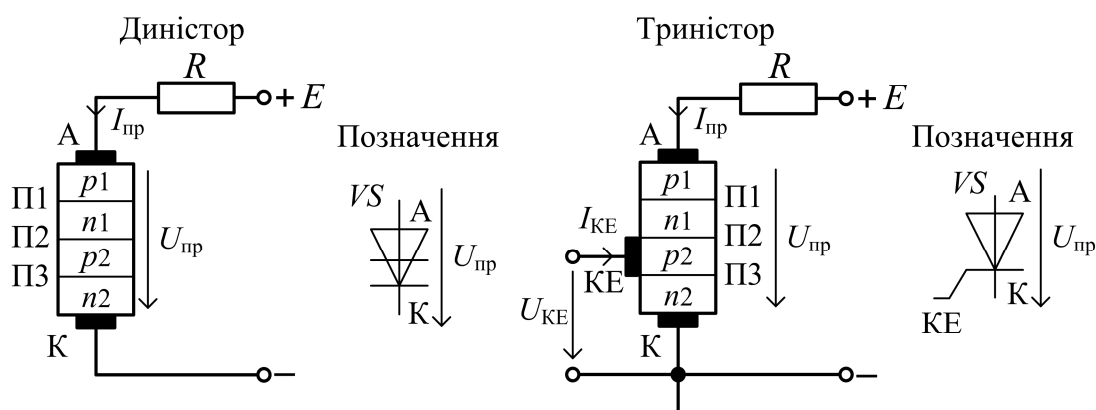
У табл. 11.3 наведені параметри польових транзисторів і транзисторних збірок.

Таблиця 11.3

Тип транзистора	Параметри		
	$U_{CB\ max},\ В$	$I_{C\ max},\ А$	$I_3,\ мкА$
З керованим <i>p-n</i> переходом	5–100	10^{-2} –1,0	10^{-3} – 10^{-2}
З ізольованим затвором	10–1000	10^{-4} –5,0	10^{-9} – 10^{-4}
З індукованим каналом	50–1000	10^{-4} –1,0	≈ 0
Транзисторні збірки (типу <i>IGBT</i>)	1000–6000	100–3000	10^{-4} – 10^{-1}

11.2.6. Тиристори

Тиристором називається напівпровідниковий прилад вентиляного типу, який відкривається для пропускання електричного струму при досягненні порогового значення напруги між анодом А й катодом К або за умови подачі невеликої напруги на керуючий електрод КЕ. Структура й умовні позначення двох видів тиристорів подані на рис. 11.19.



При включенні тиристора на пряму напругу *p-n* переходи П1 і П3 відкриваються, але перехід П2 попадає під зворотну напругу й може відкритися тільки при досягненні пробійного рівня напруги (диністор) або

завдяки подачі напруги U_{KE} на керуючий електрод (триністор). В обох випадках відкривається $p-n$ перехід П2 і починає проходити прямий струм $I_{пр}$, а падіння прямої напруги $U_{пр}$ на тиристорі стає менше одного вольт. Відбувається так зване «включення» тиристора. Щоб тиристор заклався треба зменшити прямий струм до нуля й подати зворотну напругу $U_{зв}$. Вольт-амперні характеристики диністора подано на рис. 11.20, а і триністора наведені на рис. 11.20, б.

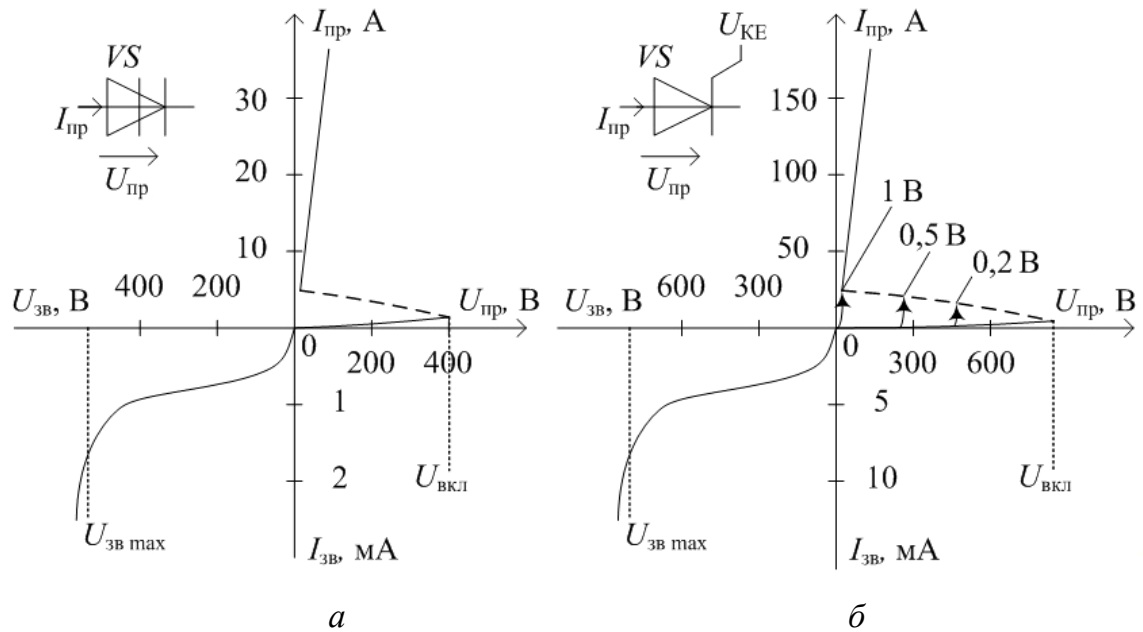


Рисунок 11.20

Запитання для самоконтролю

1. Що таке напівпровідники? Чим вони відрізняються від провідників і діелектриків?
2. Назвіть напівпровідникові матеріали. До яких груп таблиці Менделєєва належать ці хімічні елементи?
3. Які носії заряду існують у напівпровідниках?
4. Охарактеризуйте явище домішкової провідності напівпровідників.
5. Поясніть, як утворюються напівпровідники *n*-типу і *p*-типу.
6. Поясніть властивості напівпровідників *n*-типу і *p*-типу. Які носії електричних зарядів у них є основними, а які – неосновними?
7. Що називають електронно-дірковим або *p-n*-переходом?
8. Поясніть структуру й основні властивості цього переходу.
9. Що таке пряме та зворотне включення електронно-діркового переходу?
10. Як змінюється потенціальний бар'єр і ширина електронно-діркового переходу залежно від прямого та зворотного включення?
11. Поясніть, що являє собою електричний та тепловий пробої *p-n*-переходу.
12. Назвіть основні типи напівпровідникових приладів та укажіть кількість *p-n*-переходів у них.
13. Наведіть класифікацію та умовні позначення напівпровідникових резисторів.
14. Що таке варистор? Накресліть його вольт-амперну характеристику.
15. Що таке коефіцієнт нелінійності варистора?
16. Що таке терморезистор?
17. Накресліть температурні характеристики термістора і позистора.
18. Що таке температурний коефіцієнт опору?
19. Що таке тензорезистор?
20. Накресліть деформаційні характеристики тензорезисторів *n*- і *p*-типу.
21. Що таке коефіцієнт тензочутливості?
22. Що таке фоторезистор?
23. Накресліть світлову і вольт-амперну характеристики фоторезисторів.
24. Що таке загальна чутливість фоторезистора?

25. Що таке напівпровідниковий діод?
26. Наведіть класифікацію та умовні позначення напівпровідникових діодів.
27. Які властивості відображає вольт-амперна характеристика діода?
28. Що таке напівпровідниковий стабілітрон?
29. Що таке напівпровідниковий варикап?
30. Що таке фото- і світлодіоди.
31. Що таке транзистор?
32. Наведіть класифікацію та умовні позначення транзисторів.
33. Накресліть структуру та умовне позначення біполярних транзисторів $p-n-p$ і $n-p-n$ -типів. Позначте основні елементи.
34. Назвіть і наведіть схеми включення біполярного транзистора.
35. Наведіть вхідні та вихідні характеристики біполярного транзистора.
36. Наведіть та поясніть будову польового транзистора.
37. Що таке тиристор?
38. Наведіть та поясніть будову тиристора.
39. Наведіть структуру та умовні позначення диністора і триністора.
40. Поясніть принцип дії диністора і триністора. Накресліть їх вольт-амперні характеристики.

Розділ 12

ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЖИВЛЕННЯ

Параметри струму головного (первинного) джерела електричної енергії (наприклад, електромережі) не завжди збігаються з тими, які потрібні для живлення як окремих електромеханічних і електронних приладів та пристроїв, так і тих, що входять до складу систем та комплексів. Тому для отримання струму потрібного виду і з потрібними параметрами застосовують перетворювачі електричної енергії, які щодо основного джерела живлення називаються *джерелами вторинного живлення*.

До них відносяться:

- вже відомі нам трансформатори (зміна напруги);
- випрямлячі (змінний струм на постійний);
- інвертори (постійний на змінний);
- перетворювачі частоти (зміна частоти і, якщо потрібно, напруги).

12.1. Випрямлячі

Випрямлячі бувають однофазні й багатofазні (в основному, трифазні), некеровані й керовані. Структурна схема випрямляча наведена на рис. 12.1.

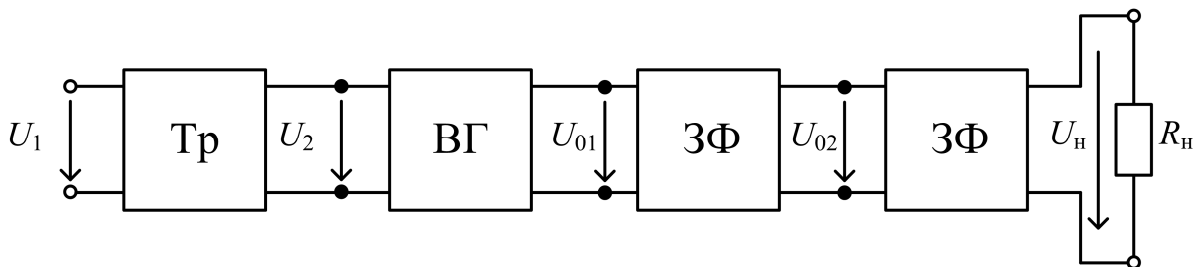


Рисунок 12.1

Тр – трансформатор; ВГ – вентильна група; ЗФ – згладжувальний фільтр; Ст – стабілізатор постійної напруги.

За допомогою трансформатора первинна напруга u_1 перетворюється на змінну напругу u_2 потрібного рівня, а далі вентиляною групою (або одним вентиляем) перетворюється на випрямлену пульсуючу напругу u_{01} . Напруга u_{02} на виході з фільтра майже не має пульсацій, а стабільну напругу u_H на навантаженні R_H підтримує блок стабілізації.

Основні електричні параметри випрямляча:

- середні значення випрямлених струму й напруги $I_{H\text{сер}}, U_{H\text{сер}}$;
- потужність навантаження $P_{H\text{сер}} = U_{H\text{сер}} I_{H\text{сер}}$;
- частота основної гармоніки $f_{\text{осн}} = k f_1$ (k – число пульсів за період; f_1 – частота в електричній мережі);
- амплітуда основної гармоніки випрямленої напруги $U_{\text{осн}m}$;
- коефіцієнт пульсації випрямленої напруги $p = \frac{U_{\text{осн}m}}{U_{H\text{сер}}}$;
- максимальна зворотна напруга $U_{3B\text{max}}$.

12.2. Однофазні некеровані випрямлячі

Розглянемо роботу некерованих випрямлячів на активне навантаження, зосередившись на перетворенні струму у вентиляній групі.

Розглянемо три види випрямлячів однофазного змінного струму: *однопівперіодний, двопівперіодний з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора, двопівперіодний мостовий.*

Схема однопівперіодного випрямляча і його часові діаграми напруг і струмів мають такий вигляд як на рис. 12.2.

Коли діод VD знаходиться під прямою напругою, крізь навантаження R_H проходить струм $i_H = \frac{u_2}{R_H}$, і $u_H = R_H \cdot i_H = u_2$. У наступному півперіоді діод підпадає під зворотну напругу і розриває електричне коло, тому струм $i_H = 0$, а $u_H = R_H \cdot i_H = 0$. Вся напруга u_2 прикладається до діода, а її максимальне значення дорівнює $U_{3B\text{max}} = U_{2m}$. Щоб не сталося пробою діода, його треба вибирати з приблизно 30 % запасом: $U_{\text{max доп}} \geq 1,3 U_{2m}$.

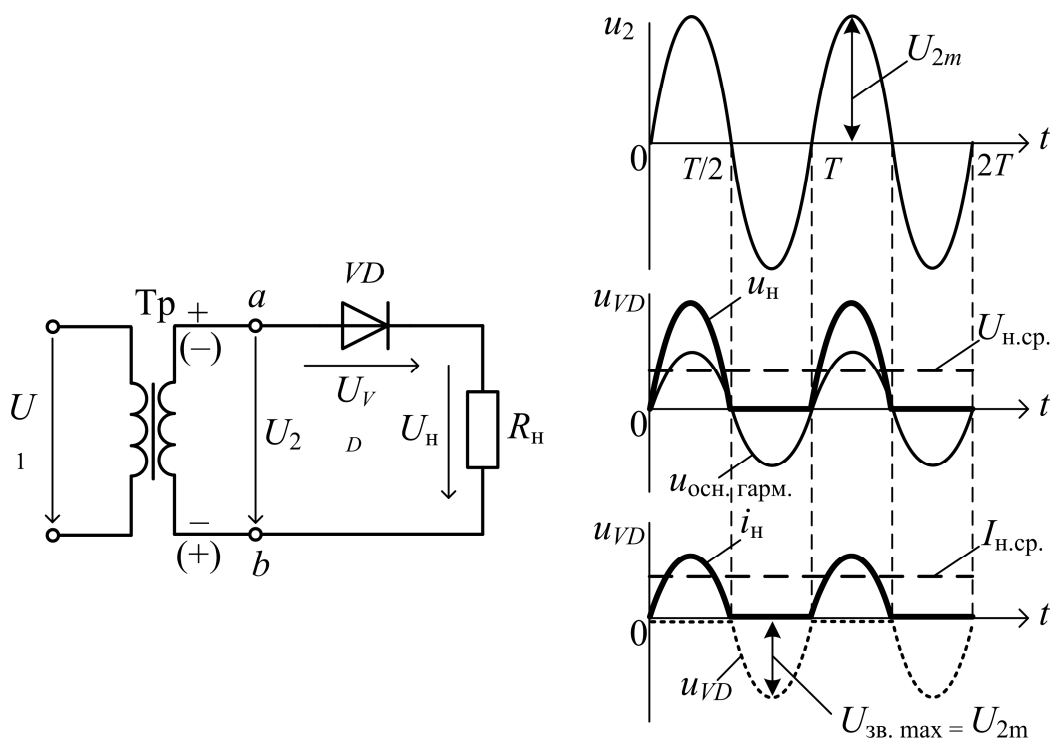


Рисунок 12.2

Основна перевага однопівперіодного випрямляча полягає в його простоті. Недоліки – у великому коефіцієнті пульсації p і низькому значенні випрямлених струму й напруги.

Схема двопівперіодного випрямляча з виводом середньої точки і його часові діаграми мають такий вигляд, як показано на рис. 12.3.

Кожні півперіоду під пряму напругу підпадає діод $VD1$ або діод $VD2$ (відповідно, під зворотну напругу діод $VD2$ або діод $VD1$). Зворотна напруга на закритому діоді дорівнює повній напрузі u_2 , а максимальне її значення – U_{2m} .

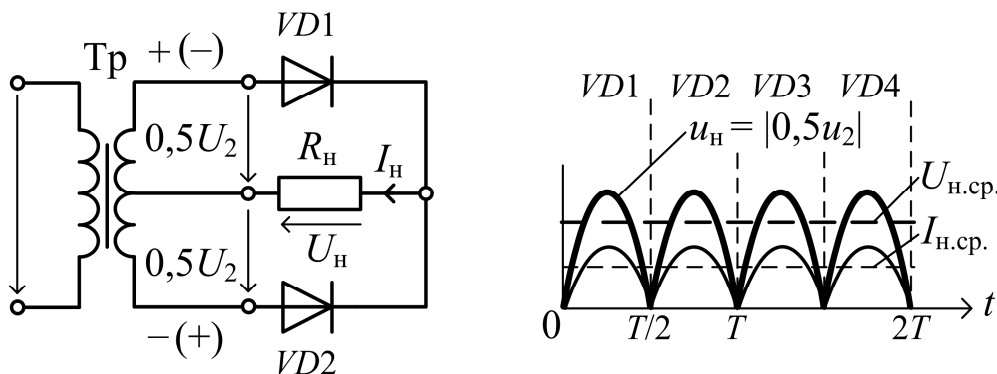


Рисунок 12.3

Найбільш поширеним є *двопівперіодний мостовий випрямляч*, схема й часові діаграми якого мають такий вигляд, як наведено на рис. 12.4.

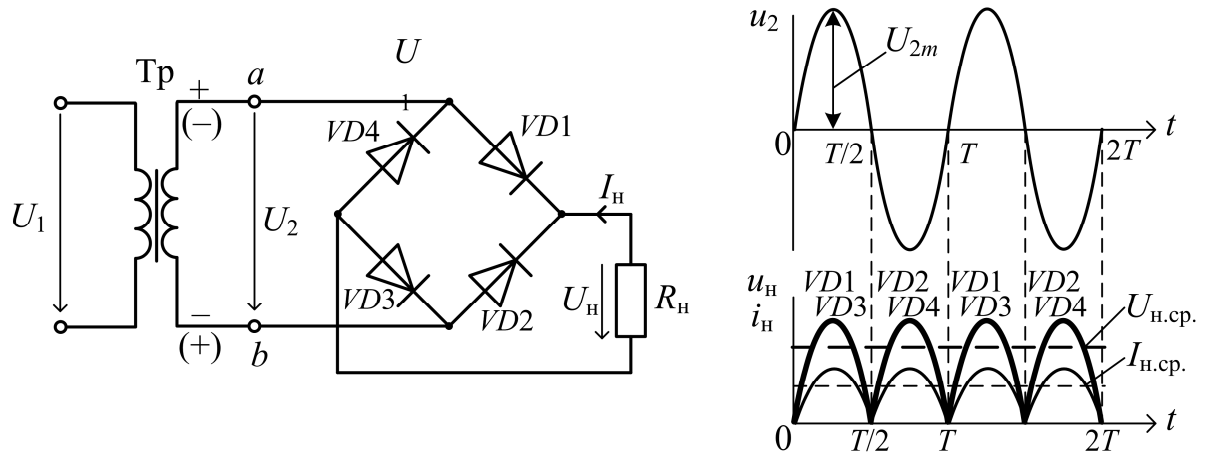


Рисунок 12.4

Якщо в першому півперіоді діоди $VD1$ і $VD3$ відкриті, то діоди $VD2$ і $VD4$ знаходяться під зворотною напругою, максимальне значення якої досягає U_{2m} .

Мостова схема надає можливість удвічі підвищити струм й напругу при однаковій напрузі u_2 .

12.3. Трифазні некеровані випрямлячі

Розрізняють два основні типи випрямлячів: з нейтральним виводом і мостовий.

Схема *трифазного випрямляча з нейтральним виводом* і його часові діаграми мають такий вигляд, як подано на рис. 12.5.

Він складається з трифазного трансформатора, обмотки якого з'єднані «зіркою», а в кожній фазі вторинної обмотки встановлений діод. Кожну третину періоду один з діодів знаходиться під більшою (порівняно з двома іншими) фазною напругою. Він відкривається, і крізь нього проходить струм i_n на навантаження R_n . До двох інших прикладена зворотна напруга, що дорівнює лінійній напрузі u_2 , а її максимальне значення $U_{зв\max} = \sqrt{3}U_2$.

Коефіцієнт пульсації p у такому випрямлячі є значно меншим порівняно з однофазними випрямлячами.

Трифазний мостовий випрямляч, незважаючи на подвійну кількість діодів, за багатьма показниками кращий за розглянутий випрямляч з нейтральним виводом. Його схема й часові діаграми мають такий вигляд, як подано на рис. 12.6.

Пульсації випрямленої напруги є набагато меншими, а сама напруга стає удвічі більшою.

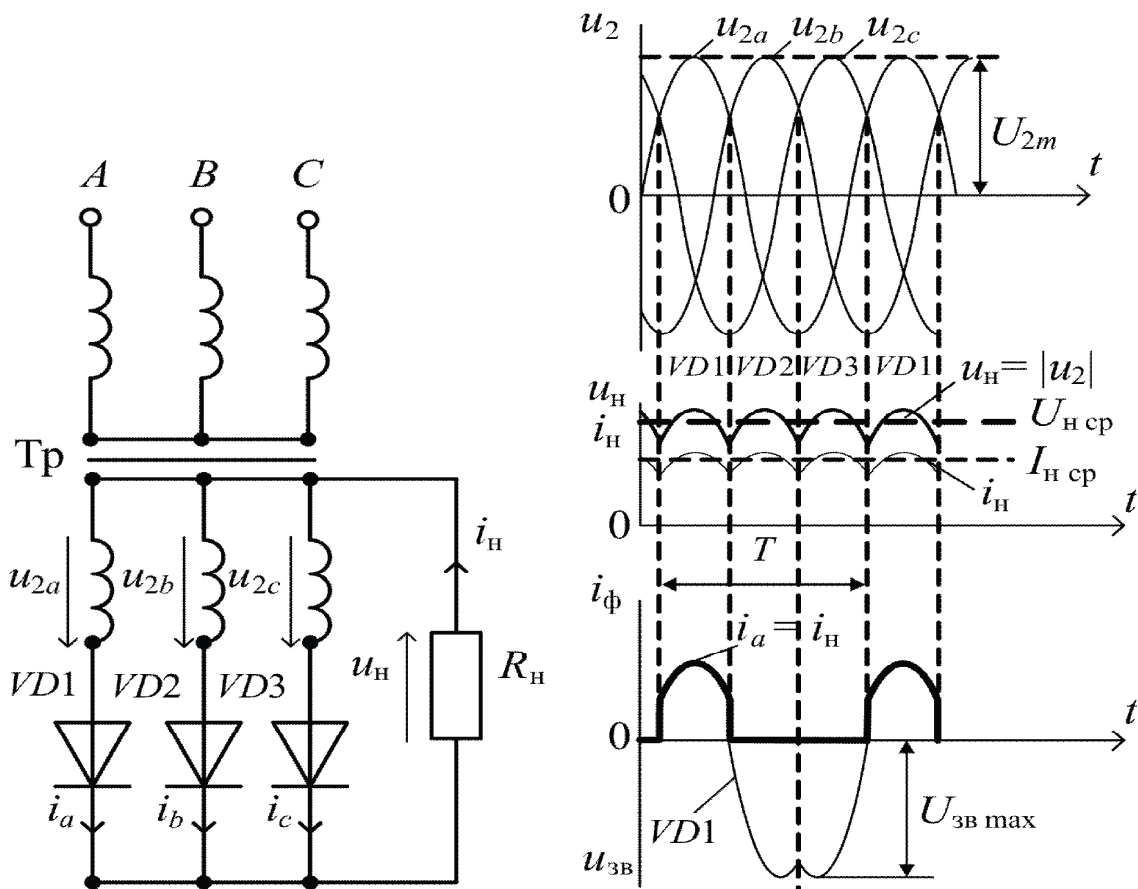


Рисунок 12.5

Основні параметри розглянутих одно- і трифазних випрямлячів подані в табл. 12.1 (k – число пульсів на період).

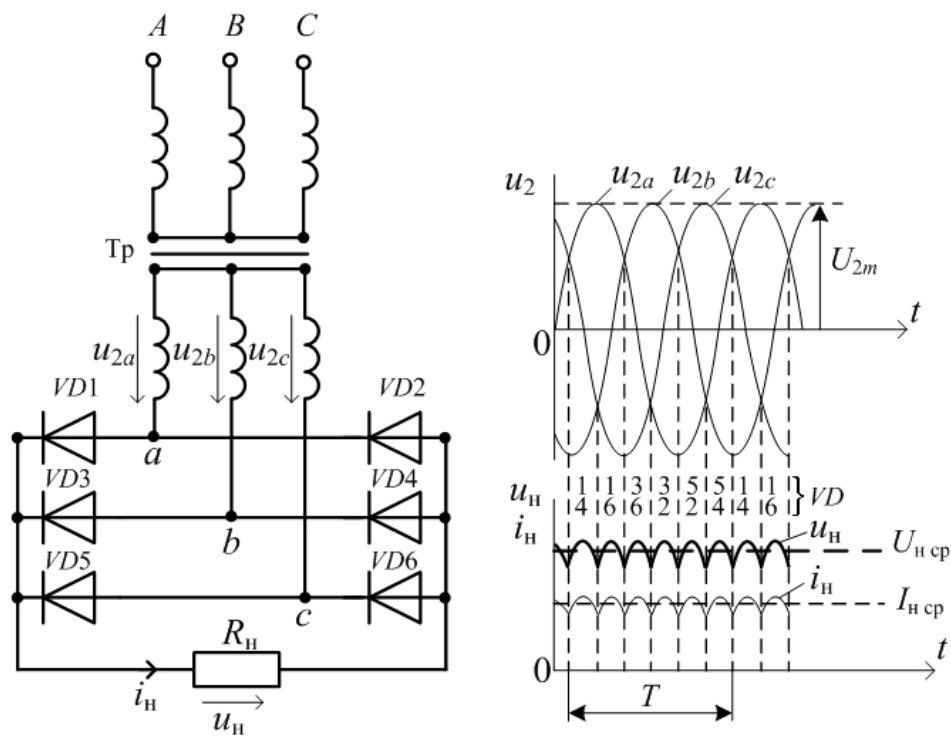


Рисунок 12.6

Таблиця 12.1

Тип випрямляча	Параметри				
	$U_{н\text{ ср}}$	$f_{осн} = kf_1$	$U_{m\text{ осн}}$	$p = \frac{U_{m\text{ осн}}}{U_{н\text{ ср}}}$	$U_{зв\text{ max}}$
<i>Однофазні:</i>					
– однопівперіодні	$0,45U_2$	f_1	$\frac{\pi}{2}U_{н\text{ ср}}$	1,57	U_{2m}
– двопівперіодні:					
а) з виводом середньої точки;	$0,45U_2$	$2f_1$	$\frac{2}{1,3}U_{н\text{ ср}}$	0,67	U_{2m}
б) мостові	$0,9U_2$	$2f_1$	$\frac{2}{1,3}U_{н\text{ ср}}$	0,67	U_{2m}
<i>Трифазні:</i>					
– з нейтральним виводом	$1,17U_2$	$3f_1$	$\frac{2}{2,4}U_{н\text{ ср}}$	0,25	$\sqrt{3}U_{2m}$
– мостові	$2,34U_2$	$6f_1$	$\frac{2}{5,7}U_{н\text{ ср}}$	0,057	$\sqrt{3}U_{2m}$

12.4. Згладжувальні фільтри

Основним параметром, який характеризує ефективність згладжувального фільтра, є коефіцієнт згладжування:

$$q = p_{\text{вх}} / p_{\text{вих}},$$

де $p_{\text{вх}}$ і $p_{\text{вих}}$ – коефіцієнти пульсацій на вході й виході фільтра.

Найбільш поширеними є прості ємнісний та індуктивний фільтри. Їх робота визначається тим, що зміна напруги на конденсаторі й струму в індуктивній котушці не може відбуватися миттєво.

12.5. Ємнісний фільтр

Ємнісний фільтр включається паралельно навантаженню $R_{\text{н}}$. Використовується ємнісний фільтр при $R_{\text{н}} \gg 0$. Його роботу пояснюють часові діаграми (рис. 12.7).

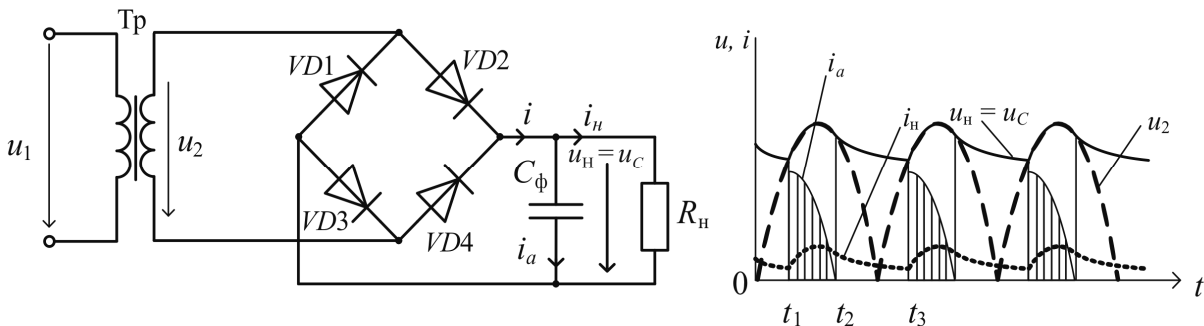


Рисунок 12.7

У момент часу t_1 , коли напруга трансформатора u_2 починає перевищувати напругу конденсатора u_c , відповідна група діодів у мості відкривається і пропускає струм i_a , більша частина якого йде на зарядку конденсатора. Максимальна напруга, до якої може бути заряджений конденсатор C_{ϕ} , дорівнює амплітудному значенню напруги трансформатора U_{2m} . Потім, коли починається зменшення напруги u_2 і змінюється її полярність, зменшення напруги конденсатора u_c може бути повільнішим, і з моменту часу t_2 вона почне перевищувати напругу трансформатора.

Відповідна група діодів у мості підпадає під зворотну напругу й не пропускає прямий струм i_a , але струм i_H крізь навантаження R_H продовжує проходити завдяки розрядці конденсатора C_ϕ .

Час розрядки конденсатора визначає стала часу $\tau_{\text{розр}} = C_\phi R_H$. Тому, чим більше C_ϕ й R_H , тим повільніше буде спадати напруга u_c на конденсаторі під час зменшення напруги на виході з трансформатора і зміни її полярності.

Коефіцієнт пульсацій на виході з фільтра буде при цьому таким:

$$P_{\text{вих}} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн}} \cdot C_\phi \cdot R_H},$$

де $f_{\text{осн}}$ – частота основної гармоніки.

12.6. Індуктивний фільтр

Індуктивний фільтр – це дросель L_ϕ , послідовно з'єднаний з навантаженням R_H . Внаслідок того що при зміні струму в дроселі виникає ЕРС самоіндукції $e_L = -u_L = -L_\phi \frac{di}{dt}$, яка буде підтримувати струм при його зменшенні, процес проходження струму i_H крізь діод VD та опір R_H не припиняється відразу після зміни полярності напруги на виході трансформатора u_2 (рис. 12.8).

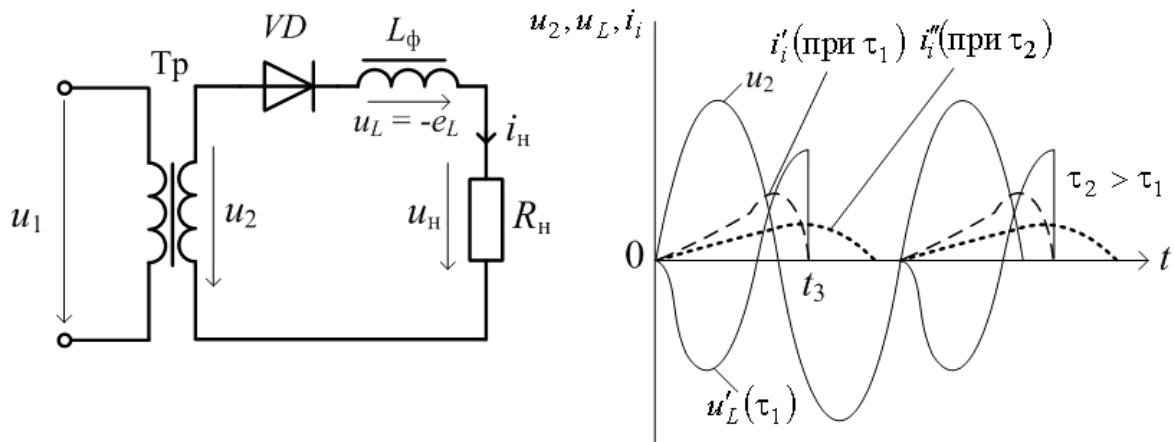


Рисунок 12.8

Уповільнення процесу залежить від сталої часу $\tau = L_{\phi} / R_H$. Коефіцієнт пульсацій на виході з індуктивного фільтра:

$$p_{\text{вих}} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн}} \cdot L_{\phi} / R_H}.$$

Чим менше R_H і, відповідно, більше струм i_H , тим меншими є пульсації. Тому індуктивний фільтр, на відміну від ємнісного, який використовується у випрямлячах малої потужності ($R_H \gg 0$), ставлять у випрямлячах середньої і великої потужності ($R_H \rightarrow 0$).

12.7. Стабілізатор напруги на стабілітроні

Схема найпростішого стабілізатора напруги зображена на рис. 12.9. В основу його покладено стабілітрон, струм крізь який може змінюватися багаторазово при незмінній нарузі на стабілітроні $U_{\text{ст}}$.

Відповідно, $U_H = U_{\text{ст}}$, а $I_H = \frac{U_H}{R_H} = \frac{U_{\text{ст}}}{R_H} = \text{const}$. Враховуючі те, що

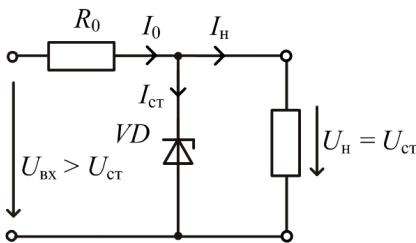


Рисунок 12.9

$I_0 = I_{\text{ст}} + I_H$, вхідну напругу можна зв'язати зі струмом стабілітрона $I_{\text{ст}}$

$$\frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{ст}}}{R_0} = I_{\text{ст}} + \frac{U_{\text{ст}}}{R_H}, \quad \text{звідки}$$

$$I_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{вх}} - \frac{R_0}{R_H} U_{\text{ст}} - U_{\text{ст}}}{R_0}.$$

Таким чином, зміна вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ призводить до зміни струму стабілітрона $I_{\text{ст}}$, який повинен залишатися в допустимих межах (від $I_{\text{ст min}}$ до $I_{\text{ст max}}$) струму I_0 , а струм I_H залишається незмінним.

12.8. Керовані випрямлячі

Керовані випрямлячі відрізняються від некерованих тим, що випрямлену напругу можна змінювати. Досягається це завдяки тому, що в

якості вентиля в них використовуються не діоди, а тиристори або транзистори, відкриттям яких можна керувати, пропускаючи лише частину прямого струму.

Досягається це за допомогою фазообертача, найпростіша схема якого й векторна діаграма подані на рис. 12.10.

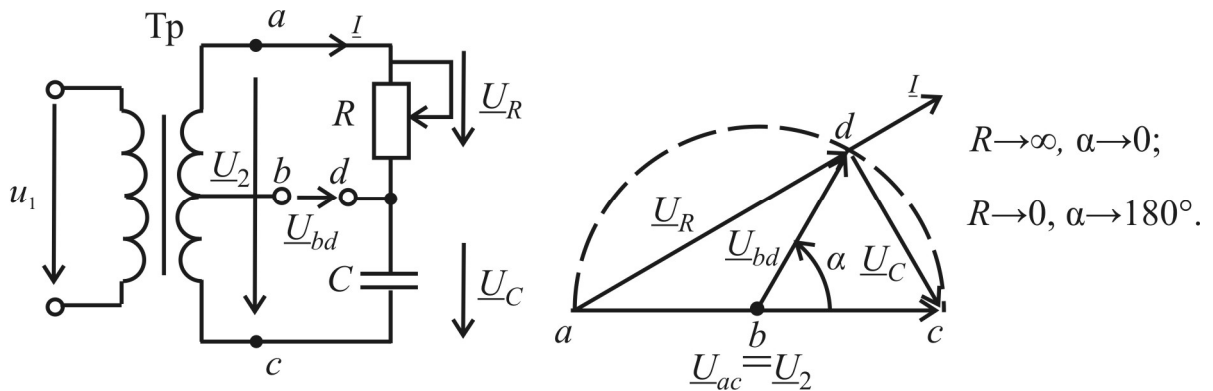


Рисунок 12.10

Вектори напруг \underline{U}_R і \underline{U}_C завжди перпендикулярні один одному, а їх векторна сума дорівнює напрузі \underline{U}_2 . Таким чином, утворюється прямокутний трикутник, який вписується в півколо, діаметром якого є вектор напруги \underline{U}_2 . Зміною опору R можна змінювати розташування вершини цього прямокутного трикутника і, відповідно, розташування вектора напруги \underline{U}_{bd} по відношенню до основної напруги \underline{U}_2 (кут α), тобто змінювати зсув по фазі між ними.

Як це реалізується в керованих випрямлячах розглянемо на прикладі *однофазного однопівперіодного керованого випрямляча*, схема й часові діаграми якого мають такий вигляд, як зображено на рис. 12.11.

Якщо середня випрямлена напруга некерованого випрямляча $U_{\text{нсер}}$, то у керованого вона буде такою:

$$U_{\text{н}\alpha} = \frac{1 + \cos\alpha}{2} U_{\text{нсер}},$$

де α – кут відкриття тиристора.

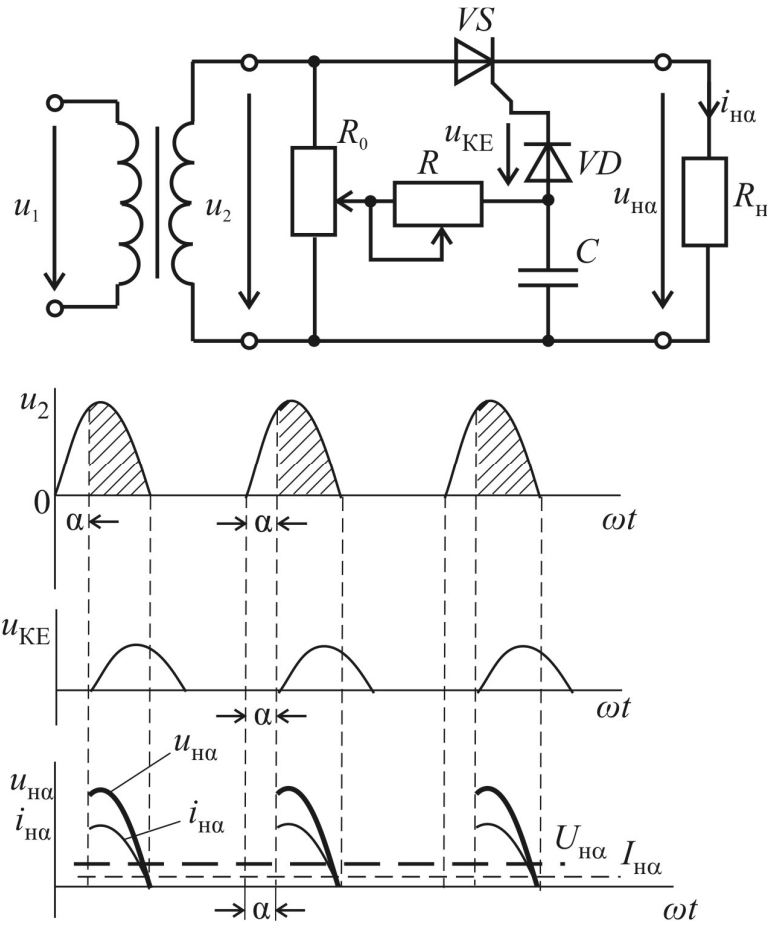


Рисунок 12.11

12.9. Інвертори

Призначаються для перетворення постійної напруги на змінну.

За видом задіяних у них комутаційних приладів розрізняють тиристорні й транзисторні інвертори.

За принципом дії – інвертори, ведені мережею, і автономні.

Інвертори, ведені електричною мережею, найчастіше використовують на електротранспорті. По суті це керовані випрямлячі, які залежно від напрямку потоку енергії працюють або як джерело постійного струму ($\alpha < 90^\circ$) для тягових електродвигунів у режимі активного руху, або як генератор ($\alpha > 90^\circ$), що віддає енергію в мережу змінного струму під час гальмування. Такий процес називається *рекуперацією*.

На рис. 12.12 зображено схему однофазного двопівперіодного інвертора, веденого мережею, який залежно від кута регулювання α може

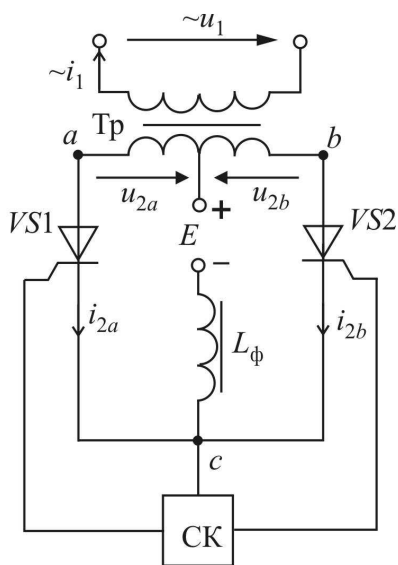


Рисунок 12.12

працювати в режимі випрямляча ($\alpha < 90^\circ$) та в режимі інвертора ($\alpha > 90^\circ$). Напрямок потоку електричної енергії визначається співвідношенням напрямків напруги і струму в первинній обмотці трансформатора Тр.

Напрямок струму в первинній обмотці відповідає напрямку струму у вторинній обмотці, що визначається кутом регулювання α . Напрямок напруг в первинній та вторинній обмотках трансформатора задається електричною мережею і від кута α не залежить.

Автономні інвертори працюють на автономне навантаження й не зв'язані із загальною мережею змінного струму. Тому вони можуть перетворювати постійний струм на змінний будь-якої частоти.

Схема найпростішого автономного інвертора й часові діаграми струмів і напруг, які пояснюють його роботу, показані на рис. 12.13.

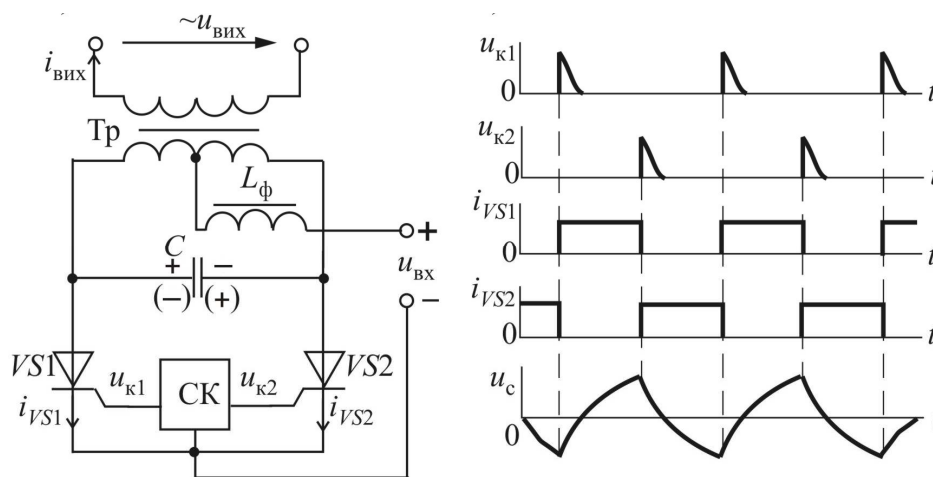


Рисунок 12.13

Напруга, що утворюється на конденсаторі, згладжується трансформатором, і на його виході напруга $u_{\text{вих}}$ практично синусоїдна.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке джерела вторинного живлення? Які пристрої відносять до цих джерел?
2. Як класифікуються джерела вторинного живлення?
3. Що таке випрямляч?
4. Наведіть повну структурну схему випрямляча. Зазначте основні електричні параметри випрямляча.
5. Охарактеризуйте основні типи некерованих випрямлячів однофазного змінного струму. Накресліть їх схеми.
6. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії однопівперіодного однофазного випрямляча.
7. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії однофазного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора.
8. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії однофазного мостового випрямляча.
9. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії трифазного випрямляча з нейтральним виводом.
10. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струму та поясніть принцип дії трифазного мостового випрямляча.
11. Що таке керовані випрямлячі?
12. Наведіть схему і часові діаграми напруг і струму однофазного однопівперіодного керованого випрямляча. Поясніть принцип його дії.
13. Що таке згладжувальний фільтр і для чого він потрібен?
14. Які елементи використовуються для згладжувального фільтра і як вони вмикаються в схемі?
15. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струмів однопівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром. Поясніть принцип дії фільтра.
16. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струмів однопівперіодного випрямляча з індуктивним фільтром. Поясніть принцип дії фільтра.
17. Наведіть схеми Г-подібних RC -фільтра і LC -фільтра. Поясніть принцип їх дії.
18. Чому дорівнює коефіцієнт згладжування RC -фільтра і LC -фільтра?
19. Що таке стабілізатор напруги (струму)?

20. Чому дорівнює коефіцієнт стабілізації за напругою?
21. Наведіть схему і поясніть принцип дії параметричного стабілізатора напруги на напівпровідниковому стабілітроні.
22. Наведіть схему і поясніть принцип дії транзисторного стабілізатора струму.
23. Що таке інвертор? Поясніть принцип його дії.
24. Наведіть схему, часові діаграми напруг і струмів автономного інвертора. Поясніть принцип його дії.

Розділ 13

ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ

Електронний пристрій, що сприяє багаторазовому збільшенню струму й напруги вхідного сигналу завдяки використанню енергії джерела живлення, називається *електронним підсилювачем*. У його основі лежить *підсилювальний каскад*, структурна схема якого має вигляд, як показано на рис. 13.1.

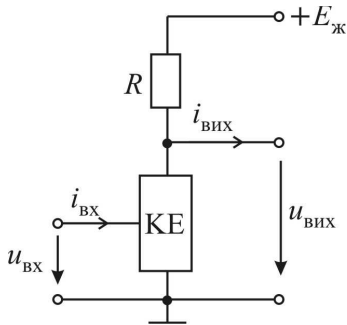


Рисунок 13.1

У якості керуючого елемента (КЕ) використовуються біполярні або польові транзистори. Слабкий вхідний сигнал відкриває або закриває транзистор, що відбивається на виході зміною напруги $0 \leq u_{\text{вих}} \leq E$ і струму $0 \leq i_{\text{вих}} \leq \frac{E}{R}$. Відповідно, це визначає коефіцієнт підсилювання:

- за напругою $K_U = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}}$;
- за струмом $K_I = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}}$.

Залежно від того, який параметр домінує, розрізняють підсилювальні каскади напруги, струму й потужності.

Якщо забезпечити потрібне підсилювання одним каскадом неможливо, створюється багатокаскадний підсилювач, структурна схема якого має вигляд, як наведено на рис. 13.2.

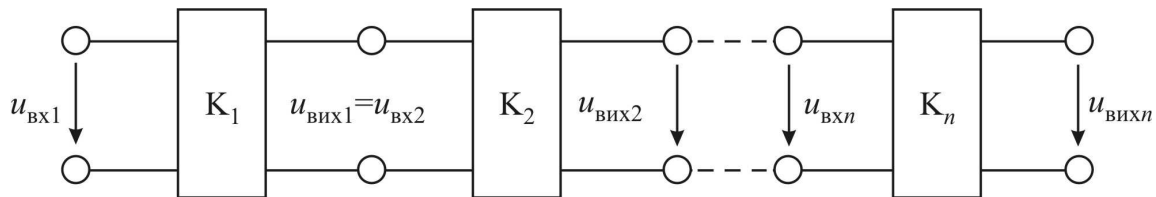


Рисунок 13.2

Коефіцієнт підсилювання багатокаскадного підсилювача, наприклад, за напругою:

$$K_U = U_{\text{вих}n} / U_{\text{вх}1}.$$

Відповідно до того, що $U_{\text{вих}1} = U_{\text{вх}2}$, $U_{\text{вих}2} = U_{\text{вх}3}$, ..., $U_{\text{вих}n-1} = U_{\text{вх}n}$, коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення всіх каскадів:

$$K_U = U_{\text{вих}n} / U_{\text{вх}1} = K_1 K_2 \dots K_n.$$

Залежно від діапазону частот вхідних сигналів розрізняють:

- *підсилювачі постійного струму* (ППС) для підсилювання сигналів, які змінюються повільно (від 0 Гц і вище);
- *підсилювачі низької частоти* (ПНЧ) для підсилювання в діапазоні від звукових частот і вище (від десятків герц до 10–15 МГц);
- *підсилювачі високої частоти* (ПВЧ) для підсилювання в діапазоні частот від десятків кілогерц до сотень мегагерц;
- *широкопasmові підсилювачі* (ШСП) для підсилювання імпульсних сигналів, що мають спектр частот від десятків герц до сотень мегагерц;
- *вузькопasmові (вибірні) підсилювачі* (ВСП) для підсилювання сигналів у вузькому діапазоні частот.

Способи з'єднання (зв'язок) каскадів у багатокаскадному підсилювачі залежать від його виду.

У підсилювачах постійного струму каскади з'єднуються безпосередньо або за допомогою резисторів. Такі підсилювачі називають *підсилювачами з безпосереднім або резистивним зв'язком*.

У підсилювачах змінної напруги (ПНЧ, ПВЧ, ШСП) зв'язок між каскадами найчастіше створюється за допомогою конденсаторів й резисторів. Такі підсилювачі називають *підсилювачами з резистивно-ємнісним зв'язком*.

І нарешті, у вибіркових підсилювачах для з'єднування каскадів між собою та в підсилювачах потужності для зв'язку вихідного каскаду з навантажувальним пристроєм іноді використовують трансформатори. Ці підсилювачі називаються *підсилювачами з трансформаторним зв'язком*.

Будова і принцип дії підсилювального каскаду як на біполярному транзисторі, так і на польовому суттєво не різняться. Тому розглянемо

підсилювальний каскад на біполярному транзисторі зі спільним емітером. Його схема з транзистором типу *n-p-n* в найпростішому варіанті наведена на рис. 13.3.

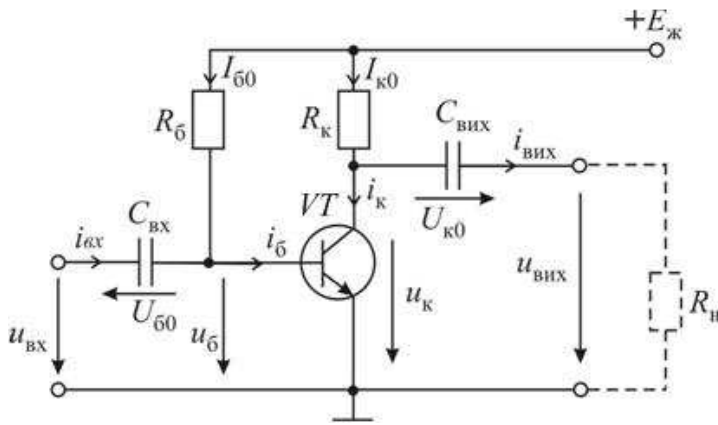


Рисунок 13.3

Транзистор *VT* з'єднується із входом і виходом підсилювального каскаду конденсаторами $C_{вх}$ та $C_{вих}$, ємність яких обира-

ється такою, щоб у діапазоні робочих частот змінний струм проходив крізь них без помітного падіння напруги. Опір $R_к$ обмежує струм короткого замикання транзистора, і дорівнює:

$$R_к = E_ж / I_{кз}.$$

Він же визначає характеристику навантаження: $u_к = E_ж - R_к i_к$.

Перехідна характеристика $i_к(i_б)$, яка зв'язує вихідну характеристику транзистора з вхідною (рис. 13.4).

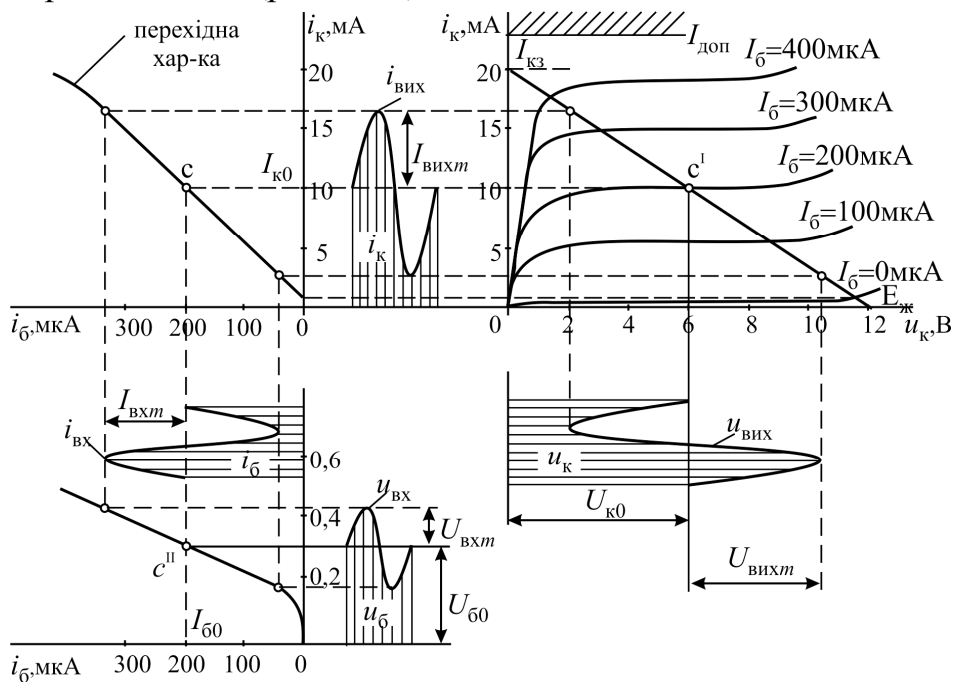


Рисунок 13.4

Визначальним для роботи підсилювального каскаду є *режим спокою*, який відповідає розподілу напруг й струмів за відсутності вхідного сигналу.

Обраний режим, який відповідає точці спокою $c'(U_{K0}, I_{K0})$ забезпечується опором $R_{\delta} = \frac{E_{\text{ж}} - U_{\delta 0}}{I_{\delta 0}} \cong \frac{E_{\text{ж}}}{I_{\delta 0}}$, через те що $E_{\text{ж}} \gg U_{\delta 0}$. Значення $U_{\delta 0}$ і $I_{\delta 0}$ знаходяться за допомогою перехідної характеристики.

Процес підсилення вхідного сигналу відбувається наступним чином (рис. 13.4). Змінна напруга $u_{\text{вх}}$, що потрапляє на вхід, додається до напруги $U_{\delta 0}$ на конденсаторі $C_{\text{вх}}$ і утворює змінну напругу на базі $u_{\delta} = U_{\delta 0} + u_{\text{вх}}$. Змінюючись у межах, визначених зміною напруги на вході, базова напруга змінює в тих же межах базовий струм, який буде тепер складатися зі струму спокою і змінного вхідного струму: $i_{\delta} = I_{\delta 0} + i_{\text{вх}}$. Внаслідок зміни базового струму змінюється колекторний струм, а це, в свою чергу, призводить до зміни напруги на колекторі. Виникають змінні струм і напруга на виході: $i_{\text{вих}} = I_{K0} - i_K$; $u_{\text{вих}} = u_K - U_{K0}$.

Якщо зміна вхідної напруги, струмів бази й колектора перебуває в межах лінійних частин характеристик, то форма вихідної напруги буде відповідати формі вхідної. Але занадто велика вхідна напруга буде за межами лінійної частини вхідної характеристики, внаслідок чого форма вихідної напруги спотворюється, а коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}}$ зменшується.

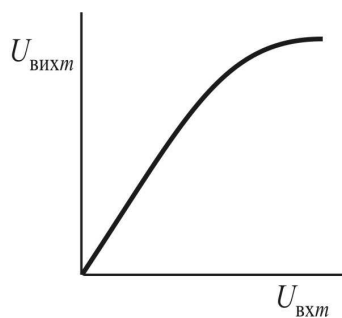


Рисунок 13.5

Це добре відображає амплітудна характеристика (рис. 13.5) підсилювального каскаду $U_{\text{вих}m}(U_{\text{вх}m})$, лінійна частина якої відповідає діапазону вхідних напруг, які не спотворюють вихідну напругу.

13.1. Температурна стабілізація підсилювального каскаду

На роботу біполярного транзистора суттєво впливає температура. Підвищення температури збільшує колекторний струм, а це погіршує ро-

боту підсилювального каскаду, оскільки лінійний діапазон підсилювання звужується.

Для того, щоб запобігти цьому, в емітерне коло додається резистор R_e і паралельно йому конденсатор C_e , ємнісний опір якого в діапазоні робочих частот близький до нуля. У коло бази вводиться розподільувач напруг $R'_\delta R''_\delta$ для створення початкової напруги зсуву між базою й емітером:

$$U_{\delta e} = \frac{E_{\text{ж}} R'_\delta}{R'_\delta + R''_\delta} = R_e I_{\text{ко}}.$$

При збільшенні емітерного струму $I_E \cong I_K$ внаслідок підвищення температури зменшується $U_{\delta e}$ і, відповідно, базовий струм. Зменшення

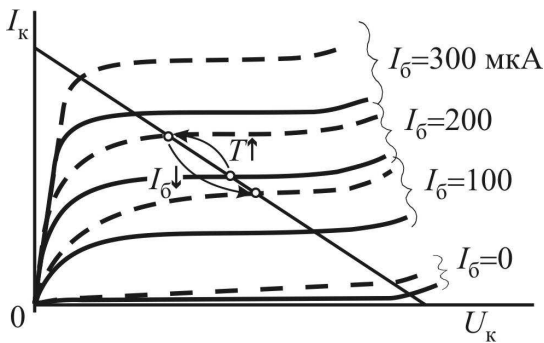


Рисунок 13.6

базового струму сприяє поверненню назад точки спокою на колекторній характеристиці.

Одночасно конденсатор C_e , що шунтує резистор R_e , дозволяє уникнути зменшення змінної напруги вхідного сигналу при передачі її на базу – емітер:

$$u_{\delta e} = u_{\text{вх}} - \frac{R_e x_{C_e}}{R_e + x_{C_e}} \cdot i_e \cong u_{\text{вх}},$$

через те що $x_{C_e} \rightarrow 0$.

13.2. Режими роботи підсилювального каскаду

Залежно від розташування точки спокою розрізняють три основні режими роботи підсилювальних каскадів: А, В, С.

Режим А. Робоча точка s , як правило, обирається посередині лінійних ділянок вхідної й перехідної характеристик.

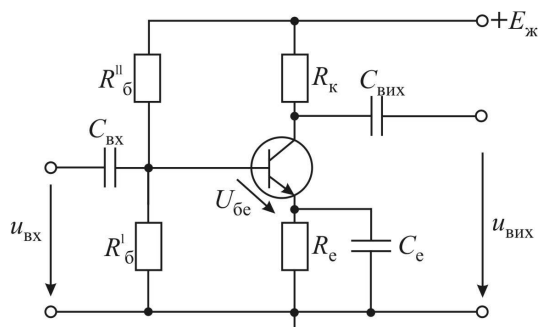


Рисунок 13.7

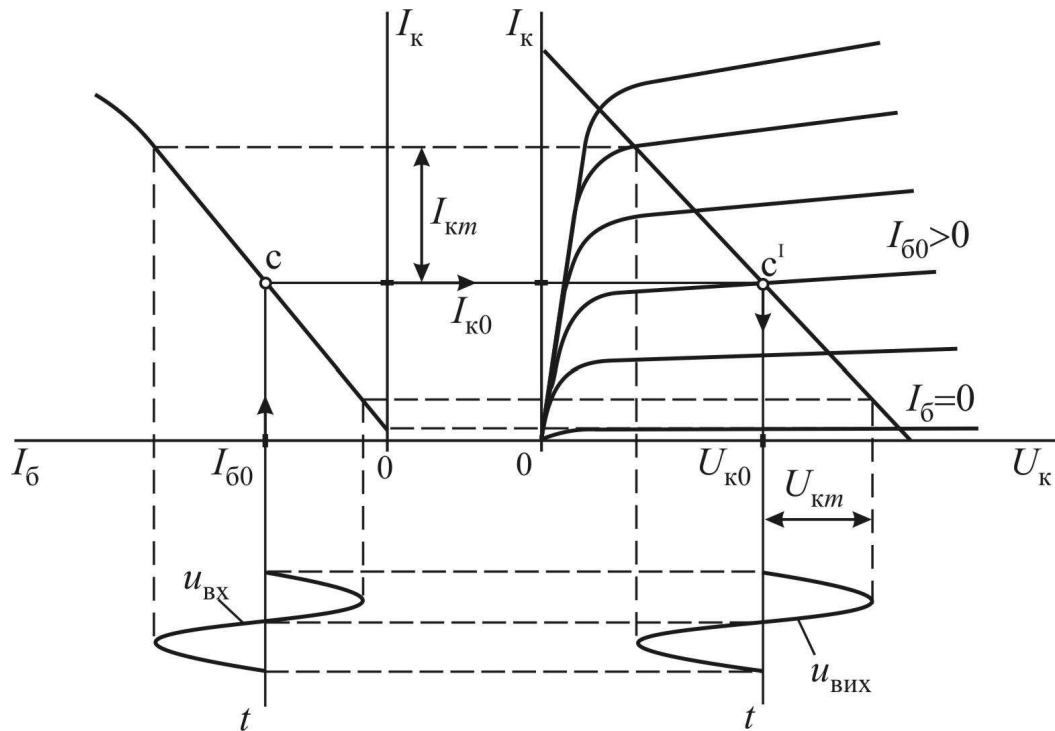


Рисунок 13.8

Підсилювання вхідного сигналу відбувається практично без спотворень. Однак він має такий суттєвий недолік, як низький ККД.

Коефіцієнт корисної дії підсилувального каскаду $\eta = P_{\text{вих}} / P_0$, де $P_{\text{вих}} = U_{\text{вих}} I_{\text{вих}}$ – потужність на виході; $P_0 = E_{\text{ж}} I_{\text{к0}}$ – потужність, яку витрачає джерело живлення.

У режимі А $U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{км}}}{\sqrt{2}}$ за $U_{\text{км}} < \frac{E_{\text{ж}}}{2}$, $I_{\text{вих}} < \frac{I_{\text{км}}}{\sqrt{2}}$ за $I_{\text{км}} < I_{\text{к0}}$.

Таким чином $\eta_A = \frac{U_{\text{км}} \cdot I_{\text{км}}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2} E_{\text{ж}} I_{\text{к0}}} < \frac{E_{\text{ж}} I_{\text{к0}}}{2 \cdot 2 \cdot E_{\text{ж}} I_{\text{к0}}} = 0,25$.

На практиці η_A рідко перевищує 0,15.

Режим В. Робоча точка c обирається на початку перехідної характеристики транзистора. Внаслідок цього змінні складові струму й напруги на виході виникають тільки в позитивні півперіоди вхідного сигналу.

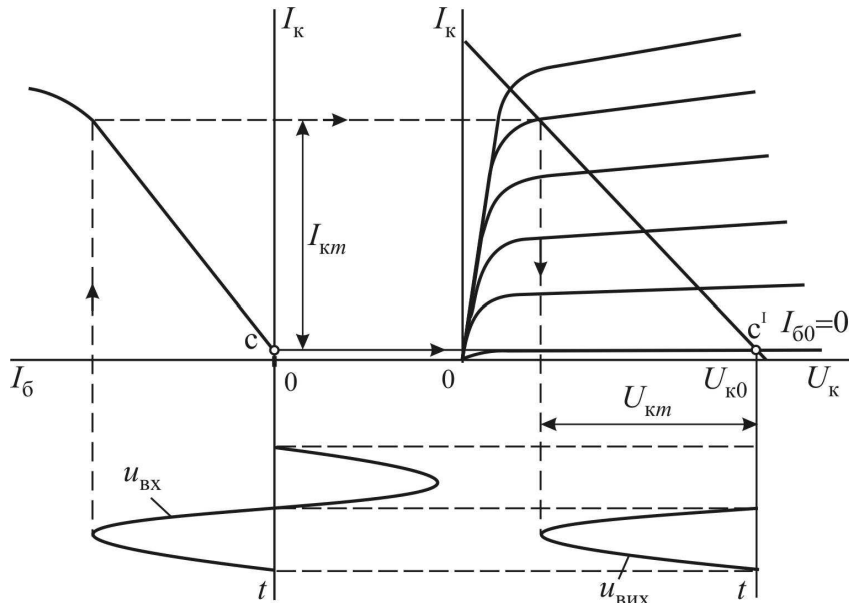


Рисунок 13.9

При синусоїдній вхідній напрузі вихідна напруга має форму напів-синусоїди. Для того щоб на виході була синусоїда, підсилювальний каскад має бути двотактним.

У наслідок того, що струм спокою близький до нуля, η_B може дорівнювати 0,6.

Режим С. Робоча точка c обирається за точкою відсічки. Тому струм у транзисторі проходить протягом частини позитивного півперіоду вхідного сигналу.

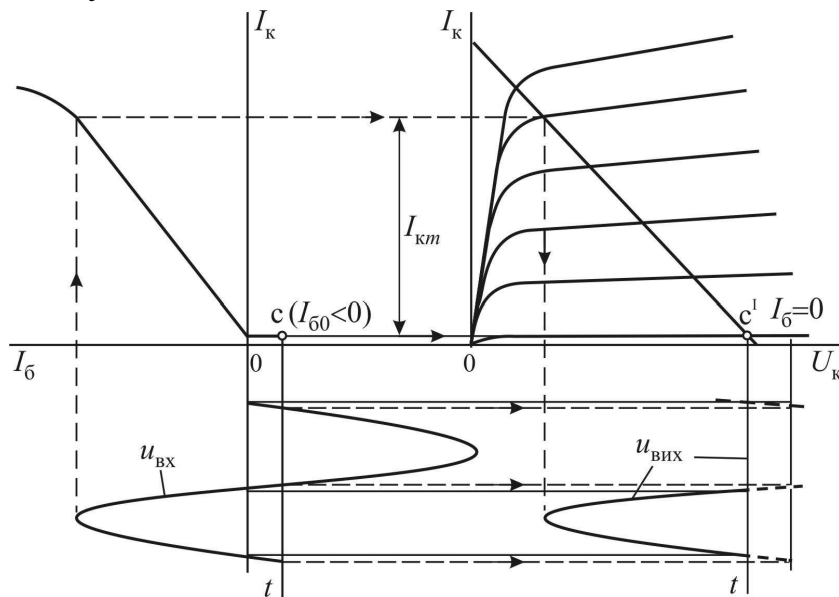


Рисунок 13.10

Це призводить до значних спотворень напруги, але η_c може бути значним і наближається до 0,8.

Двотактний підсилювальний каскад складається з двох симетричних частин (рис. 13.11).

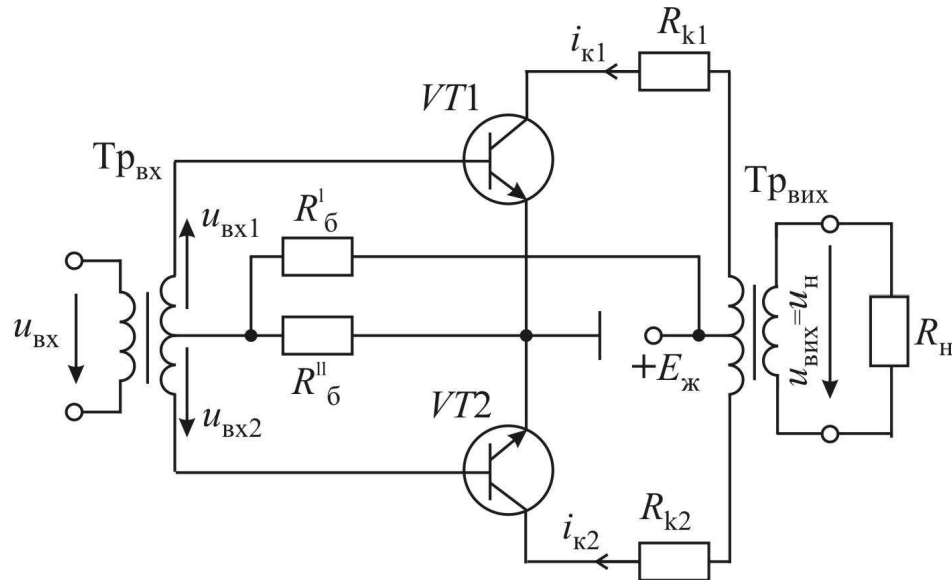


Рисунок 13.11

Транзистори $VT1$ і $VT2$, які повинні мати максимально близькі характеристики, працюють в однаковому режимі. Єдина відмінність у роботі цих транзисторів полягає в протифазній подачі напруги на їхні бази з вхідного трансформатора $Tr_{вх}$. Відповідно, зміни напруги в колекторних колах транзисторів $VT1$ і $VT2$ також будуть знаходитись у протифазі. При роботі в режимі В, коли при синусоїдній напрузі на вході залишається тільки одна напівсинусоїда на виході з транзистора, можна за допомогою вихідного трансформатора $Tr_{вих}$ скласти ці протифазні напівсинусоїди з транзисторів $VT1$ і $VT2$ та отримати синусоїдну напругу на виході з підсилювача потужності.

Резистивне-ємнісне з'єднання підсилювальних каскадів надає можливість збільшувати коефіцієнт підсилювання. Схема двокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах наведена на рис. 13.12.

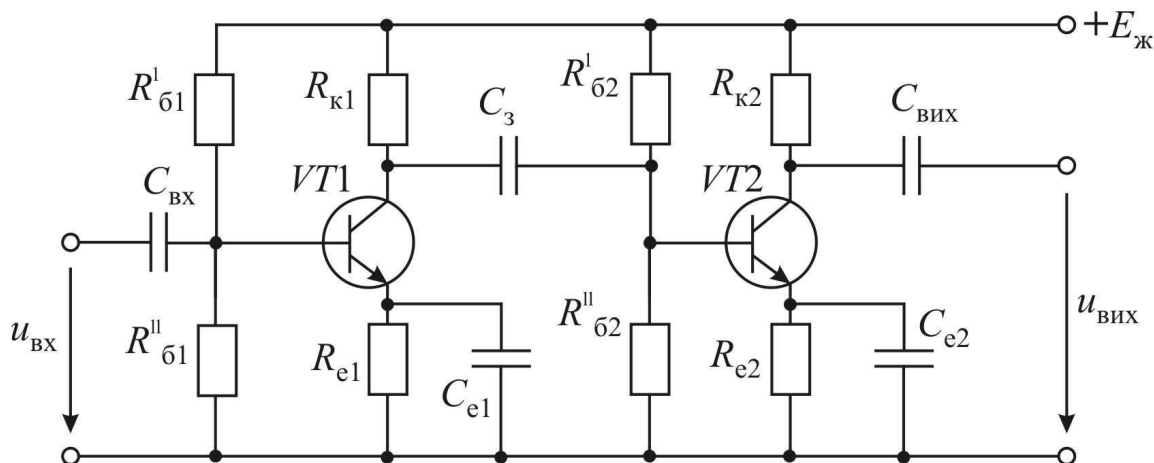


Рисунок 13.12

Якщо двох каскадів замало для отримання потрібного коефіцієнта підсилювання, можна збільшити їх кількість до 4–5, аналогічно з'єднуючі їх за допомогою конденсаторів зв'язку.

Зворотні зв'язки в підсилювачах пов'язані з використанням вихідних напруги або струму задля впливу на вхідний сигнал. Структурна схема підсилювача зі зворотним зв'язком по напрузі наведена на рис. 13.13.

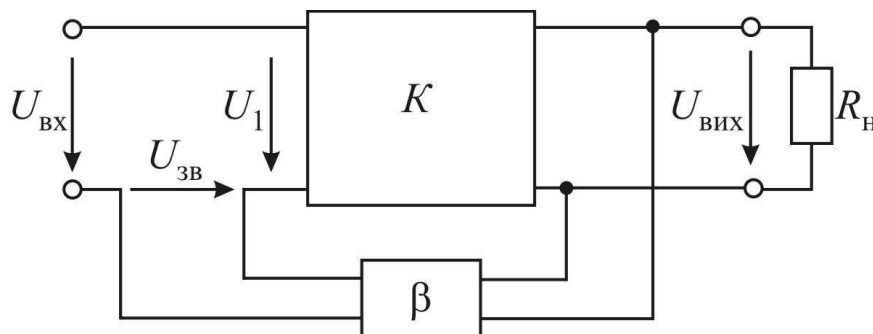


Рисунок 13.13

На вхід підсилювача через ланку зворотного зв'язку подається напруга $U_{зв} = \beta U_1$. Зворотний зв'язок може бути *позитивним* (вхідний сигнал збільшується) і *негативним* (вхідний сигнал зменшується).

Зрозуміло, що для підсилювача без зворотного зв'язку $U_{вх} = U_1$, тому його коефіцієнт підсилювання $K = U_{вих} / U_1$.

За другим законом Кірхгофа:

$$U_{вх} = U_1 - U_{зв} = U_1 - \beta U_{вих}.$$

Відповідно для підсилювача зі зворотним зв'язком коефіцієнт підсилення:

$$K_{зв} = U_{вих} / U_{вх} = U_{вих} / (U_1 - \beta U_{вих}) = K / (1 - \beta K).$$

Ця формула наочно показує, що при $\beta > 0$ (позитивний зворотний зв'язок) коефіцієнт підсилювання $K_{зв}$ збільшується порівняно з коефіцієнтом підсилення K без зворотного зв'язку, а при $\beta < 0$ (негативний зворотний зв'язок) – зменшується.

Незважаючи на зменшення коефіцієнта підсилення, негативний зворотний зв'язок використовують дуже часто. Це дозволяє істотно поліпшити роботу підсилювача через те, що:

- зростає стабільність підсилювання при зміні параметрів транзисторів;
- знижується рівень різного виду спотворень;
- розширюється пропускна смуга частот.

13.3. Амплітудно-частотні характеристики електронних підсилювачів

При зміні робочої частоти підсилювача його коефіцієнт підсилювання може суттєво зменшуватися по відношенню до номінального. При зменшенні частоти цьому сприяє збільшення падіння змінної напруги на конденсаторах; при великих частотах – ємнісні шунтування у самих транзисторах і монтажних з'єднаннях.

Крім цього, на роботу підсилювачів впливають зворотні зв'язки, особливо у вибіркокових підсилювачах.

Зменшення коефіцієнта підсилювання допускається до $0,7 K_{ном}$. Діапазон частот між верхньою f_v і нижньою f_n допустимими частотами називається *смугою пропускання* підсилювача. Поза смугою пропускання відбувається спотворення вихідного сигналу відносно вхідного.

Залежність відносного коефіцієнта підсилювання $M = \frac{K}{K_{ном}}$ для основних видів підсилювачів (амплітудно-частотні характеристики див. рис. 13.14): 1 – підсилювач постійного струму (ППС); 2 – широко-

смуговий підсилювач (ШСП); 3 – вузькосмуговий підсилювач (ВСП), ви-
бірковий.

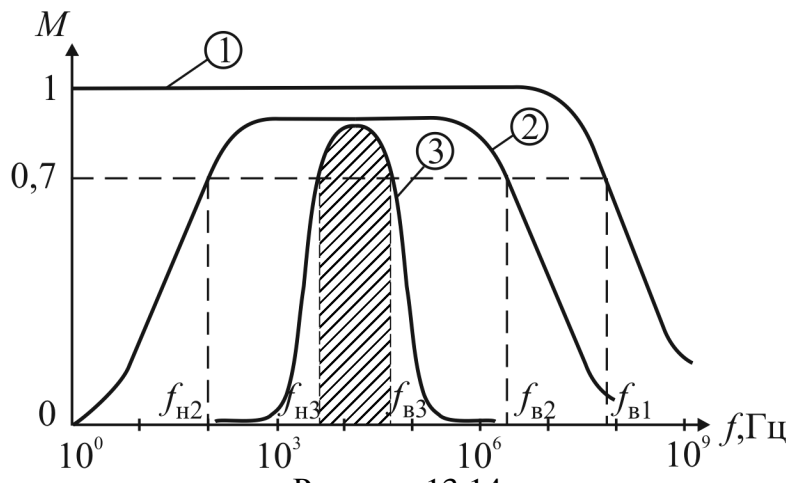


Рисунок 13.14

Запитання для самоконтролю

1. Наведіть структурну схему і поясніть принцип дії підсилювального каскаду. Якими коефіцієнтами підсилення він характеризується?
2. Наведіть структурну схему багатокаскадного підсилювача. Чому дорівнює його коефіцієнт підсилення?
3. Яким чином залежно від діапазону частот вхідних сигналів розрізняють підсилювачі?
4. Наведіть схему і поясніть принцип дії підсилювального каскаду на біполярному транзисторі зі спільним емітером.
5. Наведіть схему і поясніть призначення елементів підсилювального каскаду на біполярному транзисторі зі спільним емітером.
6. Поясніть процес підсилення вхідного сигналу підсилювального каскаду на біполярному транзисторі зі спільним емітером за допомогою вхідної, перехідної та вихідної характеристик.
7. Наведіть і поясніть схему заміщення підсилювального каскаду зі спільним емітером.
8. Наведіть схему підсилювального каскаду з емітерною температурною стабілізацією. Поясніть механізм стабілізації роботи підсилювального каскаду при підвищенні температури.
9. Наведіть схему і поясніть принцип роботи підсилювального каскаду на польовому транзисторі зі спільним витоком.
10. Від чого залежать і чим відрізняються режими роботи підсилювального каскаду?
11. Поясніть роботу підсилювального каскаду в режимі А за допомогою вхідної і перехідної характеристик. Де використовують цей режим?
12. Поясніть роботу підсилювального каскаду в режимі В за допомогою вхідної і перехідної характеристик. Де використовують цей режим?
13. Поясніть роботу підсилювального каскаду в режимі С за допомогою вхідної і перехідної характеристик. Де використовують цей режим?
14. Наведіть схему і поясніть роботу двокаскадного підсилювача напружки на біполярних транзисторах з резистивно-ємнісним зв'язком.

15. Що таке зворотні зв'язки в підсилювачах?
16. Наведіть структурну схему і поясніть роботу підсилювача зі зворотним зв'язком.
17. Який параметр характеризує зворотні зв'язки?
18. Наведіть і поясніть амплітудну та амплітудно-частотну характеристики сигналу підсилювального каскаду на біполярному транзисторі зі спільним емітером.
19. Назвіть та охарактеризуйте види зворотних зв'язків.
20. Яким чином зворотний зв'язок впливає на параметри підсилювача?

Розділ 14

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

У першу чергу, це інтегральні мікросхеми й функціональні пристрої, зв'язані з оптоелектронікою.

Інтегральна мікросхема (ІМС) – це мікроелектронний виріб, що в об'ємі 1 см^3 має неменше 5 елементних приладів і являє собою схемну й конструктивну цілісність.

ІМС характеризуються *щільністю пакування та ступенем інтеграції*. Щільності пакування відповідає кількість елементів, яка припадає на одиницю об'єму ІМС. Ступінь інтеграції визначається загальною кількістю елементів, що входять до складу ІМС: перший ступінь інтеграції – до 10 елементів, другий – від 10 до 100 елементів, третій – від 100 до 1000 елементів і т.д.

За технологією виготовлення розрізняють *гібридні та напівпровідникові* ІМС. Залежно від функціонального призначення всі ІМС діляться на *лінійно-імпульсні та логічні*.

До лінійно-імпульсних мікросхем відносять ті ІМС, які забезпечують приблизно пропорційну залежність між вхідними й вихідними сигналами. Як правило, це напруги. Найпростішим прикладом лінійно-імпульсної мікросхеми є широкосмуговий підсилювач. Його коефіцієнт підсилювання $K \geq 50000$, верхня межа частоти пропускання досягає 20 МГц і вище.

Логічні ІМС, у більшості своїй, налічують декілька входів і виходів. При цьому вихідна напруга залежить від наявності чи відсутності напруг на різних входах мікросхеми. Одним з головних параметрів логічної ІМС є її швидкодія.

Загально-технічні параметри ІМС – механічна міцність, діапазон робочих температур, стійкість до зниження й підвищення тиску, вологостійкість – зазвичай є не гіршими, ніж у діодів і транзисторів.

Важливою відмінністю ІМС є їх висока надійність внаслідок того, що вони являють собою єдине ціле, а не механічне з'єднання дискретних елементів, кожний зі своїм коефіцієнтом надійності. Другою, не менш важливою особливістю ІМС, є їх невеликі масогабаритні параметри. Маса великої ІМС, що налічує сотні тисяч елементів, становить усього кілька грамів, і це при тому, що основна частина маси припадає на корпус, виводи і підкладку, а не на активні напівпровідникові елементи. Щільність пакування великої ІМС досягає 10^5 ел/см³, що на два-три порядки вище порівняно з мікромодульними схемами, побудованими на дискретних елементах.

Внаслідок дуже малих розмірів ІМС суттєво зменшується вплив таких паразитних параметрів, як міжелектродні ємності та індуктивності з'єднувальних проводів. Це дозволяє створювати високочастотні підсилювачі на частоти до 3 ГГц і швидкодійні логічні схеми з затримкою не більше 0,1 нс. Позитивним є також висока економічність ІМС. Рівень енергоспоживання великих ІМС не перевищує 100–200 мВт, а для невеликих може дорівнювати 10–100 мкВт.

Гібридна ІМС являє собою з'єднання, відповідно до електричної схеми, на єдиній діелектричній підкладці (скло, кераміка, ситал або сапфір) безкорпусних активних елементів і пасивних, які утворені шляхом нанесення різного виду плівок на цю підкладку.

Безкорпусні напівпровідникові прилади й навісні елементи приклеєні у визначених місцях до підкладки, з'єднані з елементами плівкової схеми, і всі разом розміщені в герметичному корпусі з належною кількістю виводів. Щільність пакування гібридних ІМС є невеликою, до 150 ел/см³. Ступінь інтеграції – перший, другий.

Але кожен з елементів електричної схеми чітко визначений, і тому можна забезпечити близьке значення його параметрів до потрібних. До того ж дискретне розташування цих елементів і їх надійне з'єднання забезпечує високу точність параметрів гібридної ІМС у цілому. Це ро-

бить гібридні ІМС найбільш прийнятними для електронних пристроїв з відносно невеликою кількістю елементів.

Напівпровідникова ІМС являє собою єдиний кристал напівпровідника, окремі ділянки якого виконують функції активних і пасивних елементів, з'єднаних між собою відповідно до загальної електричної схеми.

Найчастіше напівпровідникові ІМС виготовляють з кремнію. Це пояснюється тим, що порівняно з германієм він має більшу заборонену зону, менші зворотні струми й вищу робочу температуру (до 150 °С). Крім цього, кремній досить легко окислюється, що дозволяє утворювати на його поверхні оксидну плівку SiO_2 , якій притаманні високі ізоляційні та механічні властивості.

Транзистори в напівпровідникових ІМС можуть бути як польові, так і біполярні, зазвичай *n-p-n*-типу. Діоди утворюються або як звичайні двошарові структури з одним *p-n* переходом, або шляхом діодного вмикання транзисторів (рис. 14.1).

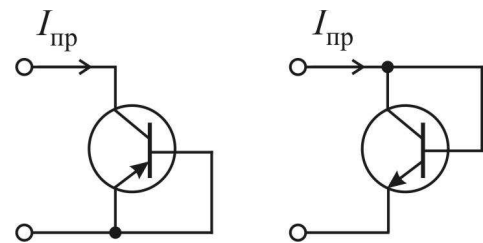


Рисунок 14.1

Роль *конденсаторів* у напівпровідникових ІМС виконують *p-n* переходи, заперті зворотною постійною напругою. Максимальна ємність, яка може бути досягнута, – 100–200 пФ. Відхилення ємності таких конденсаторів від номінальної становить $\pm 20\%$.

Резистори напівпровідникових ІМС утворюються шляхом відокремлення ділянки легованого напівпровідника і приєднанням до неї двох виводів. Опір такого резистора залежить від питомого опору напівпровідника і геометричних розмірів ділянки. Як правило, він не перевищує кількох кОм. Відхилення опору від номінального значення може бути на рівні $\pm 20\%$.

У напівпровідникових ІМС досить складно утворювати *дроселі*, тому до складу більшості напівпровідникових мікросхем індуктивні елементи не входять.

Технологічний цикл виготовлення напівпровідникової ІМС полягає в тому, що спочатку на пластину легованого кремнію методом фотолітог-

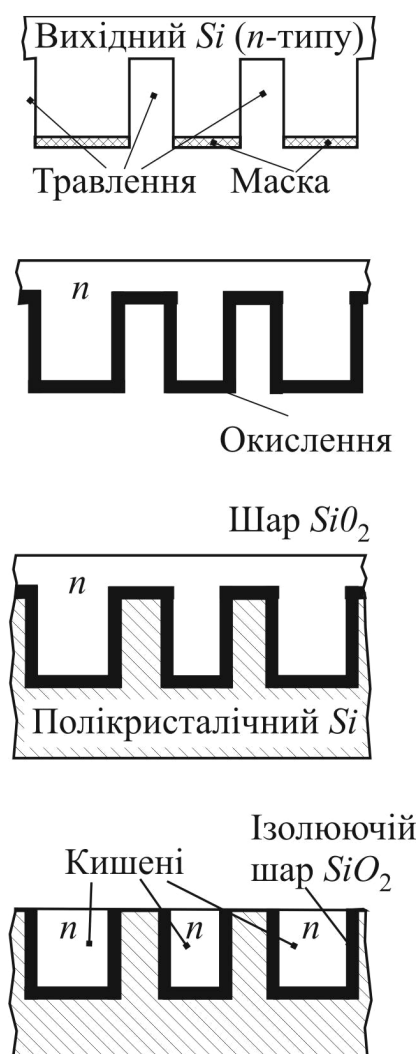


Рисунок 14.2

відповідних провідникових плівок (рис. 14.3).

На одній пластині кремнію одночасно створюється досить велика кількість мікросхем, що істотно здешевлює їх виробництво. Після розрізання пластини на окремі мікросхеми, вони розміщуються в металевих або пластмасових корпусах. Зовнішні виводи на корпусі з'єднуються з мікросхемою золотими або алюмінієвими провідниками завтовшки до 10 мкм.

У процесі розвитку мікроелектроніки з'явилися деякі різновиди біполярних транзисторів, які не мають аналогів у дискретній напівпровідниковій техніці. Це, наприклад, багатомітерний транзистор, який являє

рафії наносять захисну маску й проводять вибіркоче витравлювання кристала. Потім маску змивають, пластина кремнію окислюється при температурі 800–1200 °С у середовищі кисню або насиченої водяної пари. На поверхні кремнію утворюється плівка окису SiO_2 товщиною від 0,1 до 2 мкм, на яку напилується або нарощується шар полікристалічного кремнію. Після повторного витравлювання первинного кристала залишаються ізольовані області кремнію n -типу, так звані «кишені» (рис. 14.2).

Шляхом послідовного накладення відповідних масок і дифузії при температурі 800–1250 °С акцепторних і донорських домішок, розчинених у газовому середовищі, у кишнях утворюються потрібні ділянки з електропровідністю p - і n -типів. Таким чином, кожна кишенька стає елементом інтегральної мікросхеми, які з'єднуються між собою після вакуумного напилування крізь маску

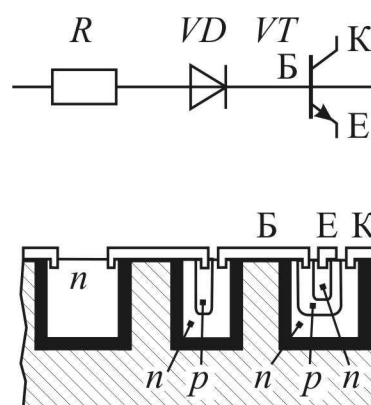


Рисунок 14.3

собою сукупність декількох n - p - n -транзисторів, що мають окремі емітери E1, E2 і E3, спільний колектор К і спільну базу Б (рис. 14.4). Де наведено будову (див. рис. 14.4, а) та умовне позначення (див. рис. 14.4, б) багато-емітерного транзистора.

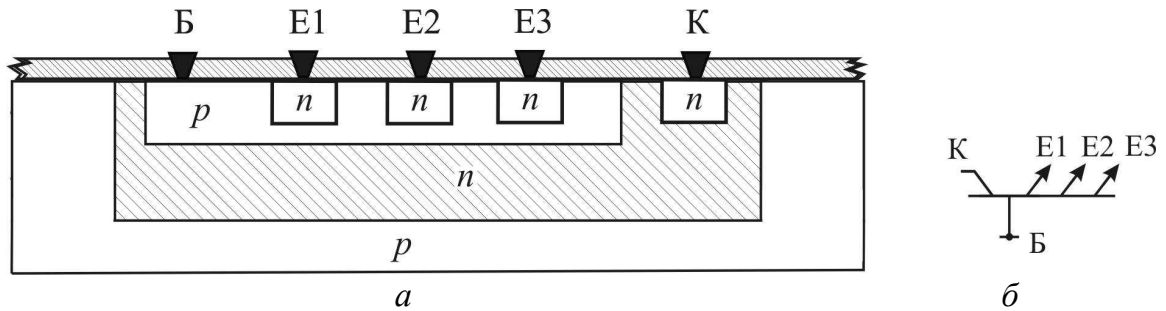


Рисунок 14.4

Особливістю цього транзистора у відкритому стані є відсутність прямої взаємодії емітерів між собою, тому що їх розділяють ділянки бази. Можна вважати, що багатоемітерний транзистор у ввімкнутому стані являє собою декілька транзисторів, що мають спільний колектор.

Напівпровідникові ІМС характеризуються найвищою щільністю пакування (до 10^5 ел/см³) і високим ступенем інтеграції (до 7-го). Але внаслідок того, що розміри елементів схеми і відстань між ними можуть мати значні технологічні відхилення, абсолютна ідентичність параметрів неможлива. Значення робочих струмів, напруг, фазних зсувів можуть істотно відхилятися від потрібних, виникають паразитні мікроструми між елементами, а все це разом відбивається на вихідних параметрах, точність яких, як правило, є значно нижчою у порівнянні з гібридними ІМС.

Загальні відомості про оптоелектроніку

Цей напрям функціональної мікроелектроніки пов'язаний як з оптичними і фотоелектричними явищами у напівпровідниках, так і з лазерною технікою, волоконною оптикою, голографією тощо.

Оптоелектроніка базується на електронно-оптичному принципі отримання, передачі, обробки і зберіганні інформації, носієм якої є електрично нейтральний фотон. Суміщення в оптоелектронних функціональних пристроях двох способів обробки і передачі інформації – оптичного та електричного – дозволяє отримувати надзвичайну швидкодію, високу

щільність розміщення інформації, яку потрібно зберігати, створювати високоефективні способи її відображення. Важливою перевагою елементів оптоелектроніки є те, що вони оптично пов'язані між собою, а електрично – ізольовані. Це забезпечує надійне узгодження різних оптоелектронних мереж, сприяє спрямованості передачі інформації, її завадостійкості. Технологія виготовлення основних напівпровідникових елементів оптоелектроніки – оптронів – збігається з технологією виготовлення ІМС.

Найпростіший оптрон являє собою чотириполюсник, що має три складові (рис. 14.5) – випромінювач світла 1, світловод 2 і фотоприймач 3, розміщені в одному світлонепроникному корпусі.

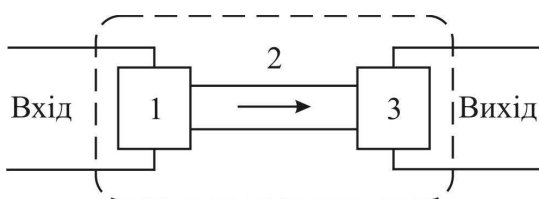


Рисунок 14.5

Найчастіше випромінювачами світла є світлодіоди зі швидкодією до 0,5 мкс, а фотоприймачами, які визначають схематичні можливості оптрона і дають назву оптронної пари, є різного виду напівпровідникові прилади. Види оптронів (схемні позначення рис. 14.6): резисторний (рис. 14.6, а); діодний (рис. 14.6, б); транзисторний (рис. 14.6, в); тиристорний (рис. 14.6, г).

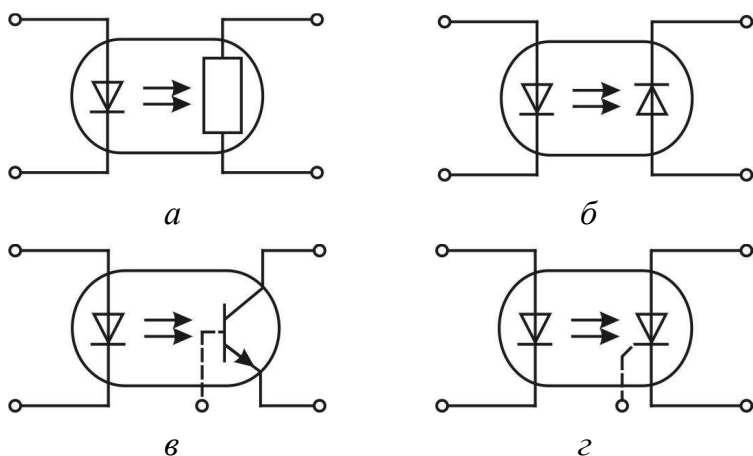


Рисунок 14.6

Залежно від сукупності характеристик оптронної пари оптрон може виконувати різні функції в електронному колі: перемикання, підсилення, узгодження, перетворення, індексацію тощо. Найпростіші схеми можливого використання оптронів показано на рис. 14.7.

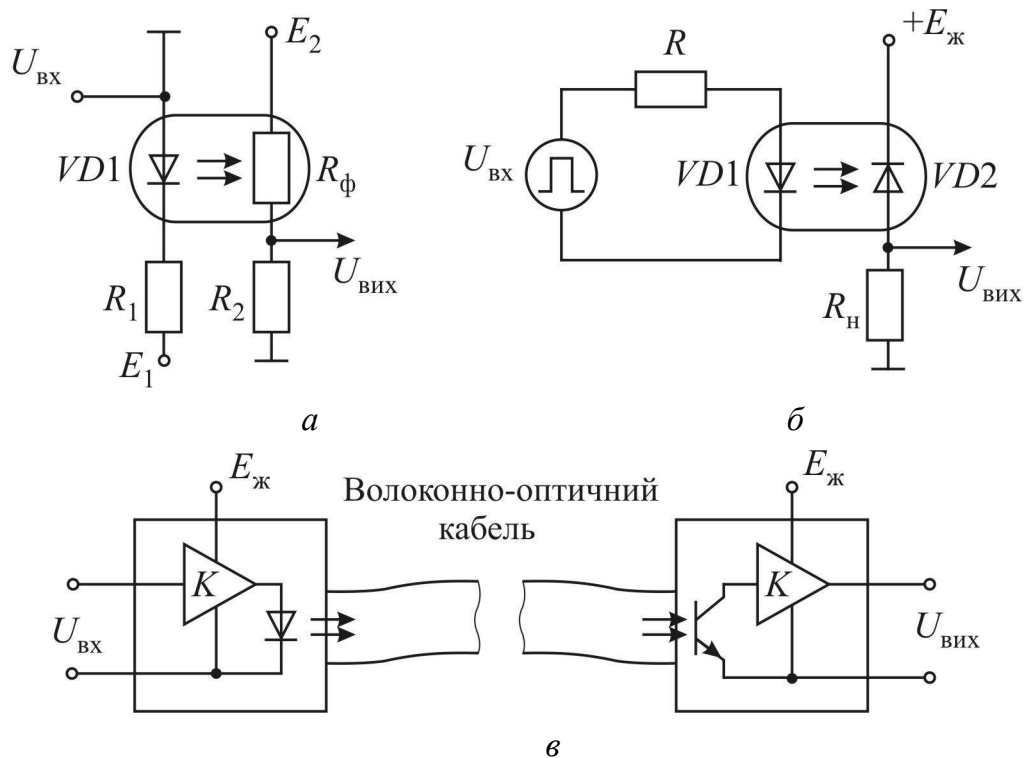


Рисунок 14.7

Поряд з ключовими функціями (рис. 14.7, а, б), за допомогою оптронів може здійснюватися оптичний зв'язок (рис. 14.7, в). У передавальному пристрої такої лінії вхідний сигнал проходить через підсилювач K і вмикає випромінювач світла (світлодіод $VD1$, лазер), яке у приймальному пристрої потрапляє на фотоприймач (фотодіод $VD2$, фототранзистор) електронного підсилювача K .

Зв'язок між передавачем і приймачем здійснюється за допомогою *волоконно-оптичного кабелю*, що забезпечує завадостійкість і високу надійність передачі. Широкосмуговість такої оптичної передачі є надзвичайною (по одній лінії зв'язку може одночасно передаватися до 10^{10} телефонних розмов або 10^6 телевізійних програм). В обчислювальній техніці подібні лінії дають можливість оперувати великими масивами інформації, яка обробляється в різних блоках ЕОМ.

Передача світла по двошаровому оптичному волокну базується на ефекті повного внутрішнього відбиття. Як відомо, кути проходження світлового променя θ_1 і θ_2 крізь поверхню поділу двох середовищ з коефіцієнтами заломлення n_1 і n_2 (рис. 14.8, а) пов'язані рівнянням:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2.$$

Якщо $n_1 > n_2$, при $\theta_1 \geq \theta_{1M} = \arcsin(n_2/n_1)$, що відповідає $\theta_2 = 90^\circ$ ($\sin\theta_2 = 1$), світловий промінь не може подолати поверхню поділу і відбивається в більш оптично щільне середовище під кутом $\beta = \alpha = \theta_1$ (рис. 14.8). Таким середовищем є серцевина двошарового оптичного волокна. При невеликих кутах падіння світлових променів на граничну оболонку оптичного волокна $(90^\circ - \theta_1) < (90^\circ - \theta_{1M})$ вся енергія світлової хвилі відбивається всередину внутрішньої жили і передається вздовж неї, не виходячи крізь оболонку (рис. 14.8, б).

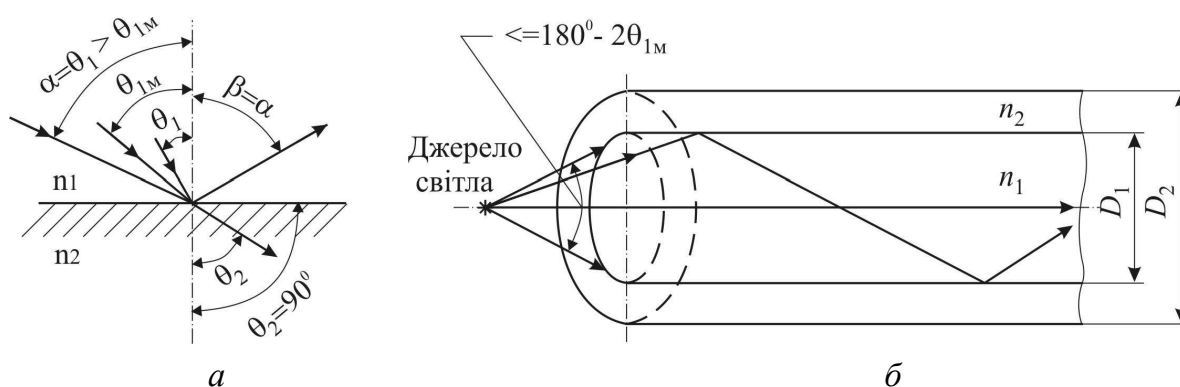


Рисунок 14.8

Найчастіше внутрішня жила виготовляється з чистого кварцу, а світловідбивальна оболонка, що має менший коефіцієнт заломлення, з кварцу, легovanого бором. Діаметр внутрішньої жили D_1 не перевищує кількох десятків мікрон, діаметр оболонки D_2 – 100 мкм. Волоконно-оптичні кабелі можуть об'єднувати до кількох сотень таких двошарових світловодів.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке мікроелектроніка? Назвіть нові напрямки її розвитку, пов'язані з функціональними пристроями.
2. Що таке інтегральна мікросхема? Назвіть основні її види залежно від ступеня інтеграції, технології виготовлення та від функціонального призначення.
3. Охарактеризуйте основні параметри інтегральних мікросхем. Назвіть позитивні фактори інтегральних мікросхем.
4. Що таке гібридна інтегральна мікросхема? З яких елементів вона утворюється?
5. Поясніть, як утворюються резистор, конденсатор та індуктивність на плівковій основі в гібридній інтегральній мікросхемі.
6. Що таке напівпровідникова інтегральна мікросхема?
7. Як утворюються транзистори, діоди, конденсатори, резистори в інтегральній мікросхемі?
8. Поясніть послідовність утворення ізольованих ділянок («кишень») у кремнієвій пластині при розробці напівпровідникової інтегральної мікросхеми.
9. Наведіть електричну схему і фрагмент напівпровідникової інтегральної мікросхеми, у якій виконані транзистор, діод та резистор.
10. Що таке оптоелектроніка? Назвіть її переваги і галузі застосування.
11. Що таке оптрон? Наведіть його структурну схему і поясніть призначення основних елементів.
12. Наведіть схеми резисторного, діодного, транзисторного і тиристорного оптронів. Які функції може виконувати оптрон в електричному колі? Поясніть, як може здійснюватися оптичний зв'язок за допомогою оптронів.
13. Поясніть будову, принцип дії, призначення та галузі застосування волоконно-оптичного кабелю.
14. Поясніть будову світловода. Яким чином енергія світлової хвилі передається вздовж внутрішньої жили і не виходить крізь оболонку?

Розділ 15

ЕЛЕМЕНТИ ЦИФРОВОЇ І МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ

В електронній автоматичній та обчислювальній техніці широке застосування знаходять логічні схеми, які виконують відповідні логічні операції. *Логічна операція* перетворює за певними правилами вхідну інформацію у вихідну.

Логічні елементи, як правило, будуються на базі електронних пристроїв, що працюють у ключовому режимі. Тому цифрову інформацію подають у двійковій формі, у якій сигнали мають тільки два значення: «0» (*логічний нуль*) та «1» (*логічна одиниця*), що відповідають двом станам ключа.

Основні логічні елементи мають такі позначення, схемні рішення та результати операцій (число входів x може бути яким завгодно, але ми обмежимося двома: x_1 і x_2).

«АБО» – логічне додавання $F = x_1 + x_2$; сигнал на виході з'являється при подачі сигналу хоча б на один зі входів (рис. 15.1).

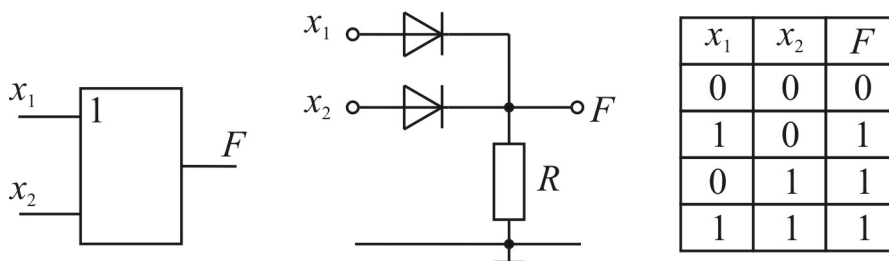


Рисунок 15.1

«І» – логічне множення $F = x_1 x_2$; сигнал на виході з'являється тільки при подачі сигналів на всі входи (рис. 15.2).

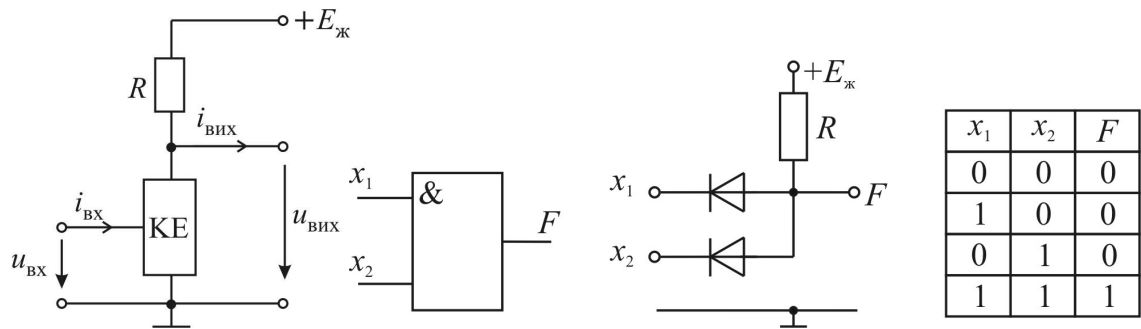


Рисунок 15.2

«НІ» – логічне заперечення $F = \overline{x}$; сигнал на виході протилежний до сигналу на вході (рис. 15.3).

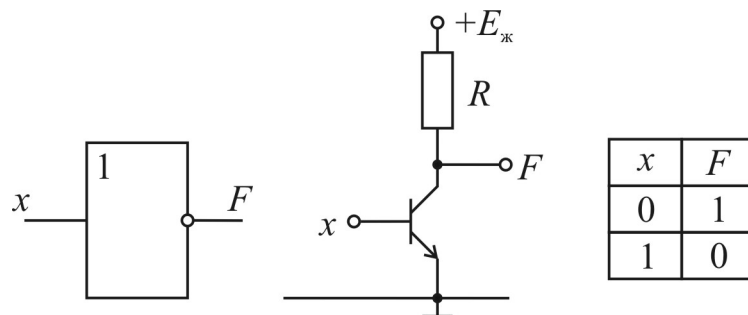


Рисунок 15.3

«АБО-НІ» – логічне заперечення додавання $F = \overline{x_1 + x_2}$; сигнал на виході знімається при відсутності сигналу на всіх входах (рис. 15.4).

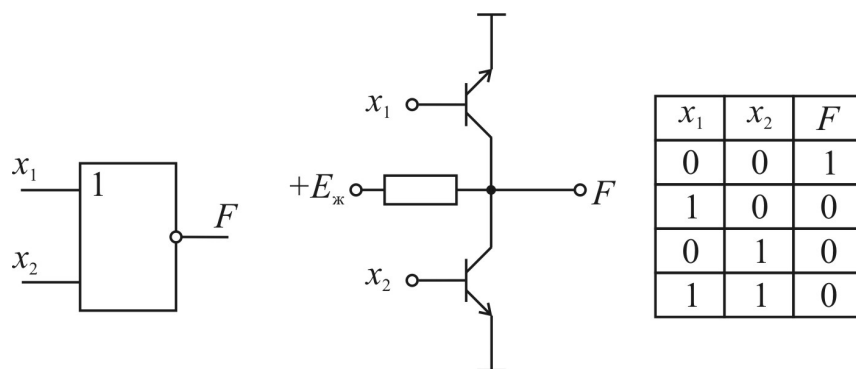


Рисунок 15.4

«І-НІ» – логічне заперечення множення $F = \overline{x_1 \cdot x_2}$; сигнал на виході знімається при відсутності сигналу хоча би на одному вході (рис. 15.5).

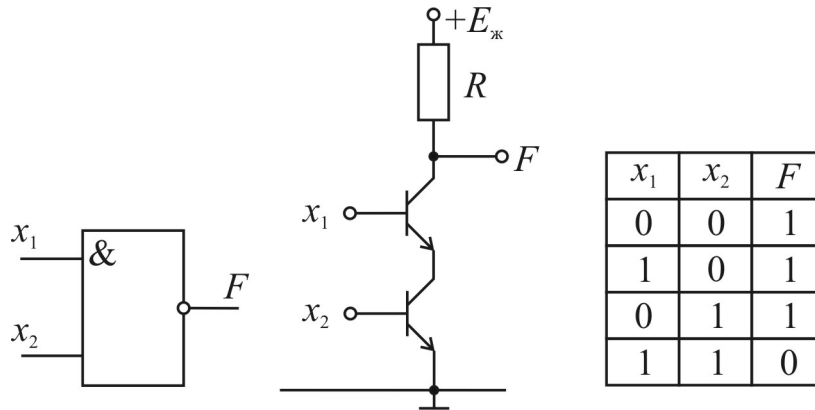


Рисунок 15.5

Тригери на логічних елементах

Тригером називається пристрій, який має два стани стійкої рівноваги і властивість стрибком переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу. Кожний з цих станів може зберігатися будь-який за тривалістю час.

Асинхронні тригери виконуються на логічних елементах «АБО-НІ» і «І-НІ» (рис. 15.6).

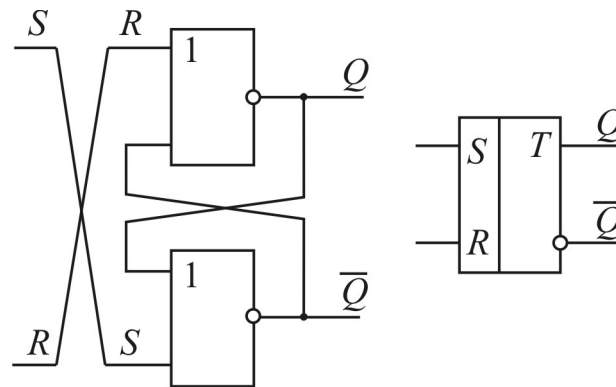


Рисунок 15.6

Схема й умовне позначення асинхронного тригера на логічних елементах «АБО-НІ» будуть такими. Один із входів S (*set*) – установка, другий R (*reset*) – скидання. Якщо на S і R сигнали не подані ($S = 0, R = 0$), то можливі два рівноімовірні стани:

- 1) $Q = 1, \bar{Q} = 0$;
- 2) $Q = 0, \bar{Q} = 1$.

Подача сигналу на S ($S = 1, R = 0$) встановлює перший стан: $Q = 1, \bar{Q} = 0$.

Подача сигналу на R ($S = 0, R = 1$) встановлює другий стан: $Q = 0, \bar{Q} = 1$, де Q – прямий вихід; \bar{Q} – інверсний.

Таким чином, сигнал на S передається на прямий вихід, сигнал на R – його скидає.

Асинхронний тригер на логічних елементах «І-НІ» має таку схему й умовне позначення див. рис. 15.7.

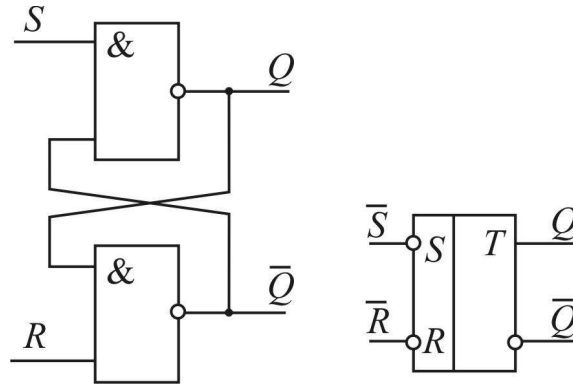


Рисунок 15.7

Його входи інверсні, тобто одночасна відсутність сигналів на S і R неможлива, бо на виході буде $Q = \bar{Q} = 1$.

Якщо подати на S і R сигнали одночасно ($S = 1, R = 1$), то можливі два рівноімовірні стани:

- 1) $Q = 0, \bar{Q} = 1$;
- 2) $Q = 1, \bar{Q} = 0$.

Подача сигналу на S ($S = 1, R = 0$) встановлює перший стан: $Q = 0, \bar{Q} = 1$.

Подача сигналу на R ($S = 0, R = 1$) встановлює другий стан: $Q = 1, \bar{Q} = 0$.

Таким чином, сигнал на S скидає сигнал на прямому виході, сигнал на R – його поновлює.

Синхронний тригер на логічних елементах «І-НІ» має таку схему й умовне позначення див. рис. 15.8.

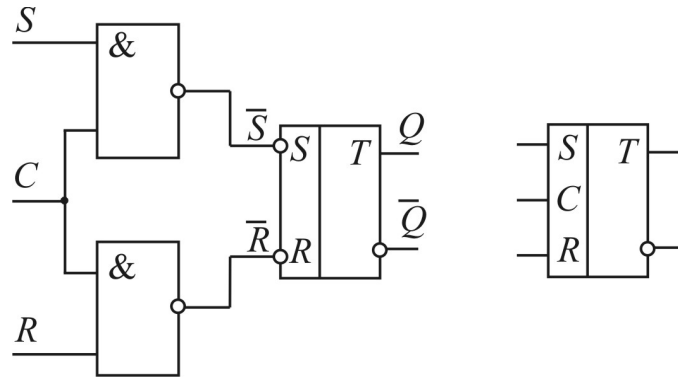


Рисунок 15.8

За відсутністю сигналу на синхронізуєчому вході C сигнали на S і R не проходять на \bar{S} і \bar{R} .

Якщо на C поданий сигнал ($C = 1$), то подальше проходження сигналу буде таким:

$$\text{при } S = 1(R = 0) \Rightarrow \bar{S} = 0(\bar{R} = 1) \Rightarrow Q = 1(\bar{Q} = 0);$$

$$\text{при } R = 1(S = 0) \Rightarrow \bar{R} = 0(\bar{S} = 1) \Rightarrow Q = 0(\bar{Q} = 1).$$

Тобто при $S = 1$ прямий сигнал проходить, при $S = 0$ – скидається.

Лічильний (тактовий) тригер побудований на двох синхронних тригерах: T_1 – ведучий; T_2 – відомий. Його схема, умовне позначення й проходження сигналу наведені на рис. 15.9.

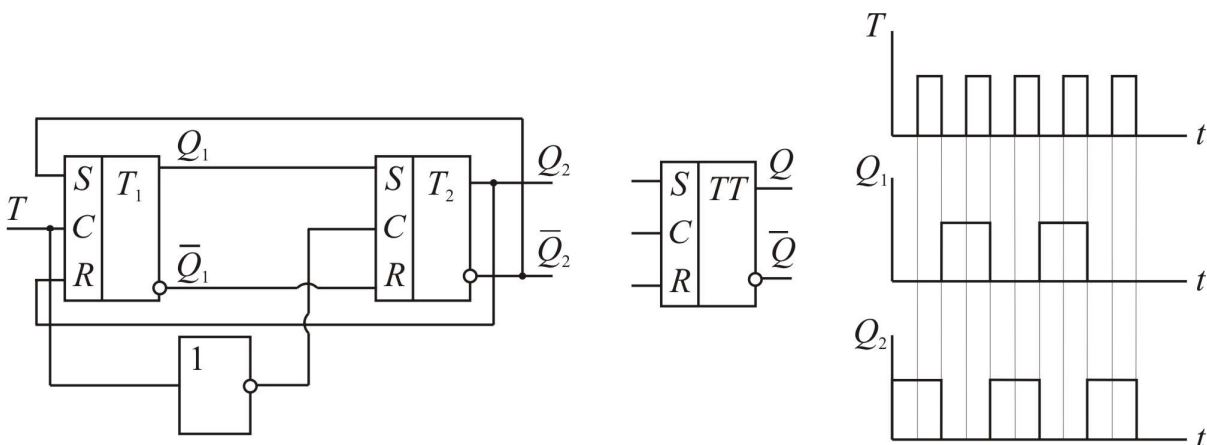


Рисунок 15.9

Лічильник імпульсів (двійкова система лічення) побудований на лічильних тригерах, кількість яких дорівнює розряду числа. Лічильник здійснює лічбу числа вхідних імпульсів і фіксує це число в будь-якому коді. Його схема, умовне позначення, графік і таблиця проходження й фіксації сигналів наведені на рис. 15.10.

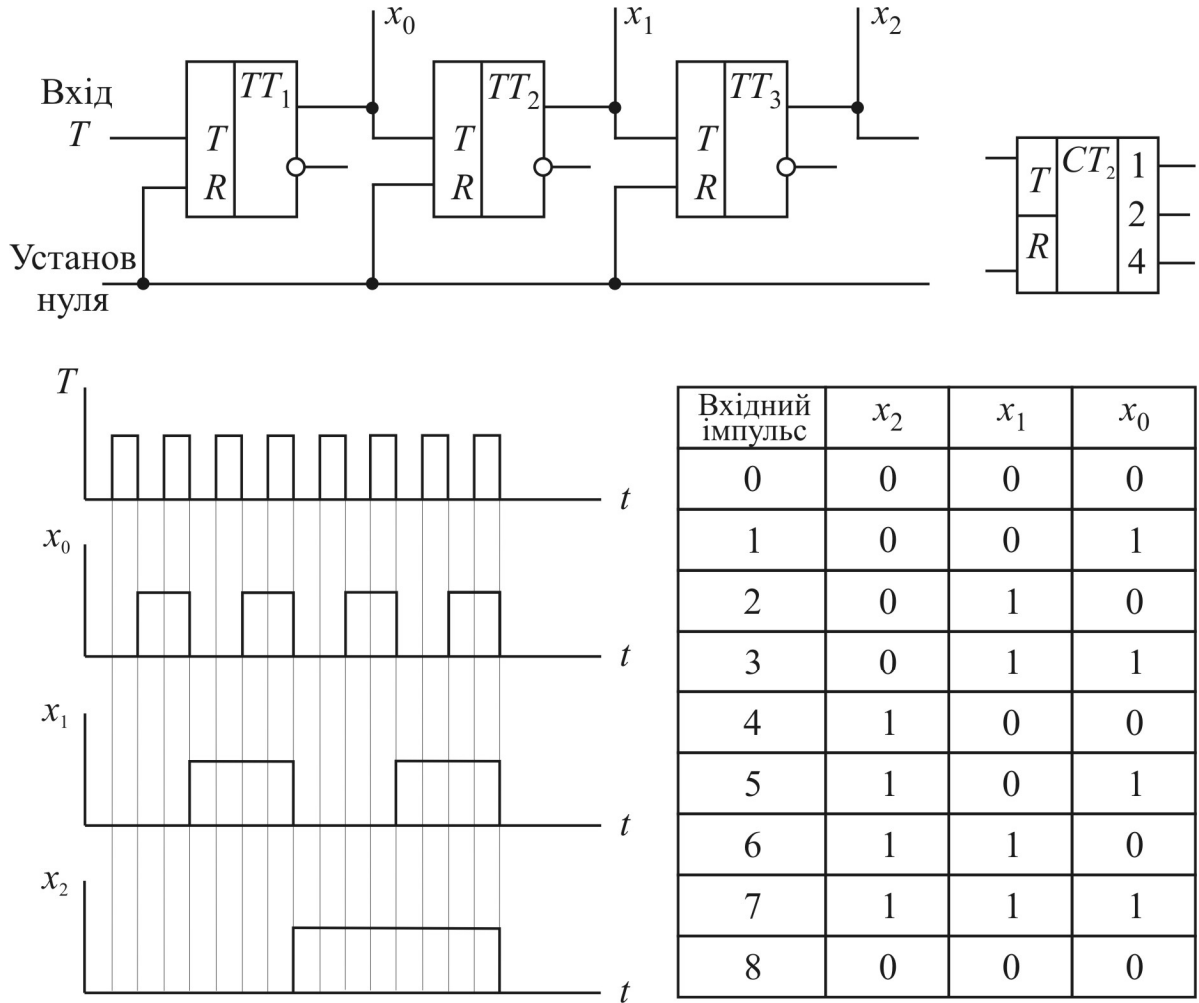


Рисунок 15.10

Запитання для самоконтролю

1. Що таке система числення? Поясніть, що таке позиційна і непозиційна системи. Наведіть приклади цих систем.
2. Поясніть будову десяткової, двійкової та шістнадцяткової систем числення.
3. Наведіть умовні позначення логічних елементів, що реалізують логічні функції АБО, І, НІ, АБО-НІ, І-НІ та ЗАБОРОНА.
4. Наведіть результати логічних операцій АБО, І, НІ, АБО-НІ, І-НІ та ЗАБОРОНА.
5. Наведіть схему і поясніть роботу логічного елемента АБО. Покажіть кодування сигналу цим елементом.
6. Наведіть схему і поясніть роботу логічного елемента І. Покажіть кодування сигналу цим елементом.
7. Наведіть схему і поясніть роботу логічного елемента НІ.
8. Наведіть схему і поясніть роботу логічного елемента АБО-НІ.
9. Накресліть схему і поясніть роботу логічного елемента І-НІ.
10. Що таке тригер?
11. Накресліть схему й умовне позначення асинхронного *RS*-тригера на логічних елементах АБО-НІ.
12. Поясніть роботу асинхронного *RS*-тригера на логічних елементах АБО-НІ.
13. Накресліть схему та умовне позначення синхронного *RS*-тригера на логічних елементах І-НІ.
14. Поясніть роботу *RS*-тригера на логічних елементах І-НІ.
15. Що таке цифровий лічильник імпульсів?
16. Накресліть функціональну схему і часові діаграми трирозрядного двійкового цифрового лічильника імпульсів.
17. Поясніть роботу цього лічильника.

Розділ 16

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО МІКРОПРОЦЕСОРНУ ТЕХНІКУ

16.1. Загальні відомості про мікропроцесори

Мікропроцесори (МП) – це пристрої, що виконують функції програмної обробки інформації, включаючи її введення і виведення, прийняття рішень, арифметичні та логічні операції, і реалізуються вони з використанням технології мікросхем великого ступеня інтеграції. *Мікропроцесорна система* являє собою невелику ЕОМ, в якій можна виділити чотири основні пристрої: арифметико-логічний, керуючий, запам'ятовувальний та пристрій введення-виведення інформації, який звичайно називається периферійним (рис. 16.1).

Арифметико-логічний пристрій (АЛП) призначений для виконання арифметичних і логічних операцій над числами, поданими в двійковому коді.

Управляючий пристрій (УП) керує роботою АЛП та інших пристроїв мікропроцесорної системи за спеціальними командами, порядок виконання яких визначається заданою програмою.

Запам'ятовувальний пристрій (ЗП), або пам'ять, призначений для зберігання програм обробки, а також інформації (даних), що обробляється.

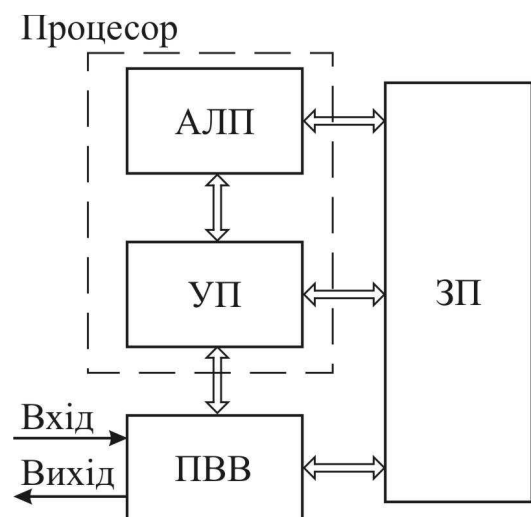


Рисунок 16.1

Пристрої введення-виведення (ПВВ) інформації, або периферійні пристрої, застосовуються для приведення вхідної інформації до вигляду, потрібного для введення в мікропроцесорну систему і виведення з неї результатів обробки інформації у належному вигляді, наприклад, послідовності чисел, таблиць, графіків.

АЛП, тісно взаємодіючи з УП, створюють єдине ціле – центральний процесор, або скорочено процесор (від англ. *to process* – обробляти). Таким чином, *процесор* являє собою пристрій, призначений для автоматичної обробки інформації за заданою програмою.

Сучасна інтегральна технологія дозволяє виконувати елементи процесора у вигляді одної або декількох великих інтегральних схем. Такі процесори отримали назву *мікропроцесорів*.

За призначенням МП поділяються на універсальні (загального призначення) і спеціалізовані. Універсальні МП використовуються для вирішення різних задач і входять до складу ЕОМ широкого призначення. Спеціалізовані МП застосовуються для вирішення конкретної задачі за певною програмою.

Мікропроцесор та сумісні з ним постійний (ПЗП) і оперативний (ОЗП) запам'ятовувальні пристрої, а також велика інтегральна схема допоміжного призначення, що забезпечує сполучення МП з ПЗП, ОЗП і ПВВ, створюють *мікропроцесорний комплект*.

За конструктивною ознакою МП поділяються на однокристальні і багатокристальні. У багатокристальному МП його складові за ознакою виконуваних функцій і за ознакою розрядності розміщуються у різних кристалах. В однокристальних МП в одному кристалі виготовляються всі складові частини мікропроцесора. У мікроЕОМ в одному кристалі напівпровідника, крім МП, містяться генератор тактових імпульсів (таймер), пристрій керування ПВВ, невеликі ОЗП і ПЗП.

Будь-який МП оперує словами, які є послідовністю символів певної довжини: 4, 8, 12, 16 і 32 біт, або розрядів. Група бітів, яку спроможна обробити ЕОМ за один крок роботи, утворює машинне слово. Довжина

машинного слова визначається числом розрядів одного регістра пам'яті ЕОМ.

Для мікропроцесорної техніки одним з основних понять є байт – восьмибітове слово, що використовується для обміну цифровою інформацією між вузлами мікропроцесорної системи. У байтах виражають довжину слів і ємність запам'ятовувального пристрою.

16.2. Структура мікропроцесора

Мікропроцесор містить три основні вузли: АЛП, УП і вузол регістрів (рис. 16.2). Для зв'язку між цими вузлами застосовується внутрішня шина даних. Вона складається з восьми ліній (для восьмирозрядного МП), якими передаються 8-розрядні слова (байти) і командна інформація. Передача слів по внутрішній шині даних здійснюється в обох напрямках, але в різні часові інтервали, які не перетинаються.

Основною частиною, або ядром, мікропроцесора є АЛП, який здійснює обробку даних. Типові операції АЛП: додавання, віднімання, логічне додавання (АБО), логічне множення (І), додавання за модулем 2 (ВИКЛЮЧАЮЧЕ «АБО»), інверсія, зміщення, пересилка. Зазвичай АЛП має два входи, які називаються вхідними портами, та один вихід, або вихідний порт.

Дані на вхідні порти АЛП надходять з внутрішньої шини даних або зі спеціального регістра, який називається акумулятором, через буферні регістри, або регістри операндів, що призначені для тимчасового зберігання даних.

Буферний регістр, через який на вхід АЛП надходять дані з акумулятора, називають *буфером акумулятора*. Результат, отриманий при виконанні операції, з вихідного порту АЛП спрямовується в акумулятор, який називається також накопичувальним регістром. Буфер акумулятора виключає ситуацію, при якій вхід і вихід АЛП підключаються одночасно до акумулятора.

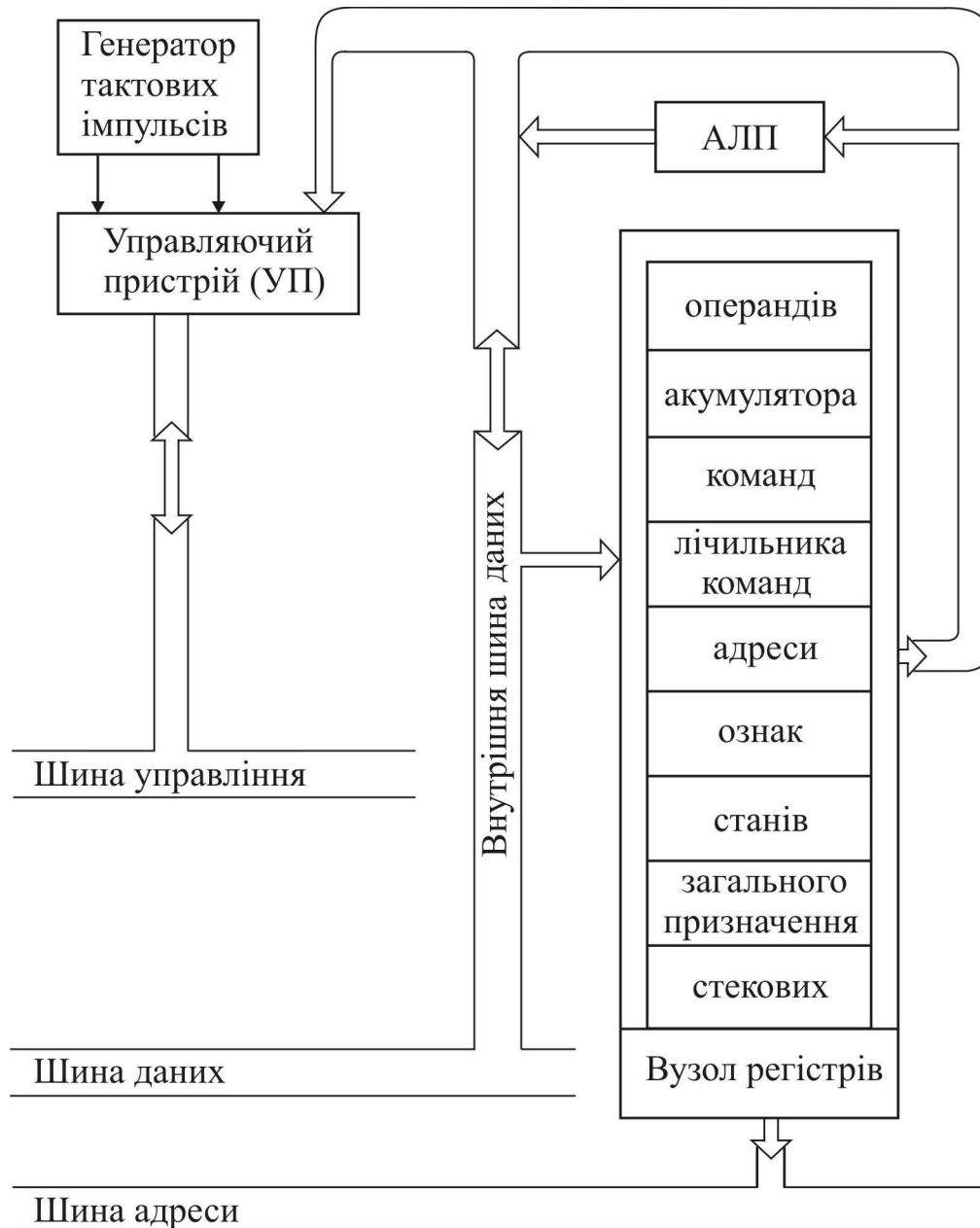


Рисунок 16.2

Роботою АЛП і внутрішніми реєстрами керує УП, який бере з реєстра команд чергову команду, дешифрує її, тобто визначає, яка операція повинна здійснюватися, і забезпечує виконання цієї операції в АЛП.

Послідовність надходження команд, необхідних для вирішення задачі, забезпечує реєстр, який називається лічильником команд. Лічильник команд може мати більше число розрядів, ніж довжина слова даних. Наприклад, у 8-розрядних МП з об'ємом пам'яті $64\text{ К} = 65536$ слів вико-

ристовується 16-розрядний лічильник команд. В результаті можна записати команду в будь-яку комірку пам'яті.

Перед виконанням програми в лічильник команд записують число, яке визначає адресу першої програми, що зберігається в ЗП. Потім це число з лічильника команд переписується в 16-розрядний регістр адреси пам'яті. З регістра адреси пам'яті по шині адреси в пристрій керування пам'яттю відсилається адреса нової команди. За зазначеною адресою з ЗП здійснюється зчитування першої команди, яка переписується в регістр команд. Розглянутий цикл операцій називають *циклом вибірки* або *фазою адресації*.

Після запису команди в регістр УП здійснює її розпізнавання (декодування), і в АЛП надходять сигнали, що стимулюють виконання даної команди. Цей процес називають *циклом* або *фазою виконання команди*. Цикл вибірки разом із циклом виконання команди утворює *цикл команди*.

На початку циклу виконання команди показання лічильника команд автоматично збільшуються на одиницю, і він налаштовується на наступну команду. Отже, в процесі виконання команди лічильник команд містить адресу наступної команди.

Регістр ознак, або *регістр прапорців*, застосовується для індикації різних ознак результатів операцій, що виконуються АЛП: нульового результату, переповнення тощо. Він складається з окремих тригерів, що називаються прапорцями, які залежно від прояву тої або іншої ознаки встановлюються в стан «0» або «1».

Регістр станів сприймає інформацію з регістра ознак і залежно від значень ознак дозволяє змінювати послідовність виконання команд і здійснювати так звані умовні переходи. При цьому змінюється вміст лічильника команд, і він налаштовується на вибірку не наступної, а потрібної команди. Таким чином, наявність команд умовного переходу робить МП більш універсальним, дозволяє обирати різні шляхи вирішення задачі залежно від тих умов, що виникають у ході вирішення.

Регістри загального призначення використовуються як запам'ятовувальні пристрої проміжних результатів обчислень, адрес та команд, а іноді і як акумулятори. Кількість таких регістрів у МП може доходити до 16, причому розрядність їх може бути різною.

Окремі реєстри загального призначення можуть з'єднуватися між собою послідовно і розглядатися як один реєстр з великим числом рядків.

Стекові реєстри діляться на *реєстри стека* і *покажчик стека*. Ці реєстри дозволяють без обміну із ЗП організувати необхідну послідовність виконання команд. Стекові реєстри підключені таким чином, що перша команда, яка записана в перший реєстр, при записуванні другої команди «проштовхується» в другий реєстр, а в перший записується друга команда. При записуванні третьої команди перша переходить у третій реєстр, друга – в другий і т.д. При виборі команд зі стека першою вибирається остання, потім передостання і т.д., подібно до того, як зі штабелю дров першою береться остання покладена дровина (від англ. *stack* – штабель).

Кількість реєстрів (глибина) стека є важливою характеристикою МП. Для збільшення глибини стека його часто організують у деякій області зовнішнього ЗП.

Покажчик стека визначає адресу комірки (реєстра) стека, заповненої останньою командою. Ця комірка називається вершиною стека. Після вибору команди зі стека вміст покажчика стека зменшується на одиницю, а при записуванні у стек чергової команди – збільшується на одиницю.

Високостабільний генератор тактових імпульсів забезпечує взаємодію і координацію роботи всіх вузлів мікропроцесорної системи. За допомогою тактових імпульсів формуються машинні цикли і цикли команд. Машинним циклом називають час, необхідний для виймання одного байта інформації з пам'яті або виконання команди, яка визначається одним машинним словом.

16.3. Система команд мікропроцесора

Мікропроцесорна система повинна отримувати інформацію ззовні, опрацьовувати її та відсилати результати у зворотному напрямку. Вона виконує операції відповідно до визначених вхідних впливів, які називаються командами. Послідовність команд утворює програму, а сукупність команд, відомих МП, створює його систему команд.

Команда, як і дані, подається двійковим кодом, утворюючи машинне слово. Довжина командного слова може дорівнювати одному, двом і більш байтам, тобто містити 8, 16 і більше розрядів. Кожна команда повинна містити певну інформацію і визначати: 1) вид виконуваної дії (частина команди, яка визначає цю операцію, називається кодом операції – КОП); 2) джерело даних (цю інформацію містить поле адреси даних: адреси операнда 1 і операнда 2); 3) адресу результату; 4) адресу наступної команди. Узагальнена структурна схема команди МП наведена на рис. 16.3.

Код операції	Адреса операнда 1	Адреса операнда 2	Адреса результату	Адреса наступної команди
--------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------------

Рисунок 16.3

Таким чином, у команді можна виділити дві основні частини – КОП та адресу. Код операції налаштовує МП на виконання потрібної операції, а адреса вказує місцеположення даних операндів, що беруть участь в операції.

У сучасних обчислювальних системах найчастіше використовуються одноадресні команди (16-розрядні), що містять КОП та адресу одного операнда. Якщо в операції беруть участь два операнди, то адреса другого операнда при цьому вважається відомою. Такою адресою найчастіше є акумулятор, в який другий операнд засилається до початку виконання операції. Результат операції також розміщується за фіксованою адресою, звичайно за адресою розміщення другого операнда.

Команди, що реалізують задану програму, через пристрій введення-виведення вводяться у певну частину ЗП.

Набір команд, виконуваних МП, поділяється на ряд груп, основними з яких є команди арифметичних і логічних операцій, пересилок, введення-виведення, керування, звернення до підпрограм і деякі спеціальні команди.

Команди арифметичних і логічних операцій забезпечують виконання операцій арифметичного додавання, віднімання і множення двійкових

та двійко-десяткових чисел, їх порівняння, а також виконання операцій логічного додавання, логічного множення, додавання за модулем 2 (ВИКЛЮЧАЮЧЕ «АБО»), інверсію чисел, тобто заміну нулів одиницями, а одиниць – нулями тощо. Після виконання цих команд результат операції надходить в акумулятор або у зазначену в цих командах комірку ЗП.

Команди пересилок використовуються для пересилання даних з однієї комірки ЗП в іншу, в акумулятор або навпаки. Як правило, ці команди здійснюються без руйнування даних у початкових комірках, тобто після виконання команди пересилки у початковій і у знову зазначеній комірках пам'яті виявляються одні й ті ж самі дані. До команд пересилки відносять команди завантаження регістра, реєстрової пари та акумулятора, пересилки з регістра в реєстр, запису вмісту акумулятора в пам'ять.

Команди введення-виведення застосовуються для введення через шину даних вхідної інформації, поданої в двійковому коді, в акумулятор МП або для виведення вмісту акумулятора на пристрій відображення інформації. Введення або виведення інформації здійснюється відповідно за командами «Ввести» або «Вивести».

Команди керування містять у собі команди безумовного й умовного переходів. За цими командами змінюється вміст лічильника команд і порушується послідовність виконання команд програми. При безумовному переході порушення послідовності виконання програми відбувається кожного разу при виконанні програми. При цьому адреса комірки, в якій зберігається команда і до якої здійснюється перехід, міститься в адресній частині команди, за якою здійснюється цей перехід.

При умовних переходах послідовність виконання команд програми порушується лише в тому випадку, коли результати обчислень, передбачені програмою, задовольняють деякій поставленій умові.

Команди звернення до підпрограм є різновидами команд керування. Звичайно підпрограми зберігаються в реєстрах стека, які, в більшості випадків, розміщуються в ЗП. Запис інформації в стек називають завантаженням даних у стек, а вибір її зі стеку – вилученням даних зі стеку.

При зверненні до підпрограми спочатку відбувається заповнення поточного вмісту лічильника команд. Потім у лічильник записується

адреса першої команди підпрограми. Останньою командою підпрограми є команда «Повернення з підпрограми», за якою в лічильнику відновлюється число, що відповідає перерваній команді основної програми. За командою «Повернення з підпрограми» може також здійснюватися перехід від однієї підпрограми до іншої, якщо використовується вкладення підпрограм.

Особливою формою підпрограми є операція, яка називається перериванням. Вона полягає в тому, що припинення дій поточної програми здійснюється довільно за запитом зовнішнього керуючого сигналу. Оскільки переривання поточної програми може відбутися у будь-якому місці, необхідно забезпечити нормальну роботу МП після повернення з переривання. Для цього в початковий момент при надходженні команди на переривання виконується запам'ятовування вмісту регістрів акумуляторів, регістрів ознак і станів у стеку.

До *спеціальних команд* відносяться команди дозволу переривання, заборони переривання, операція зупинки і неробоча операція. При виконанні команди «Неробоча операція» жодні операції не виконуються, а вміст лічильника адрес збільшується на одиницю, після чого виконується наступна за порядком команда.

16.4. Принципи побудови мікропроцесорних систем

В основу побудови мікропроцесорних систем покладено три принципи: 1) магістральності; 2) модульності; 3) мікропрограмного керування.

Принцип магістральності визначає характер зв'язків між функціональними блоками мікропроцесорних систем – усі блоки з'єднуються з єдиною системною шиною.

Принцип модульності полягає у тому, що система будується на основі обмеженої кількості типів конструктивно і функціонально завершених модулів. Кожний модуль МП системи має вхід керування третім (високоімпедансним) станом. Цей вхід називається *CS (Chip Select)* – вибір кристала або *OE (Output Enable)* – дозвіл виходу. Дію сигналу *CS* для тригера показано на рис. 16.4.

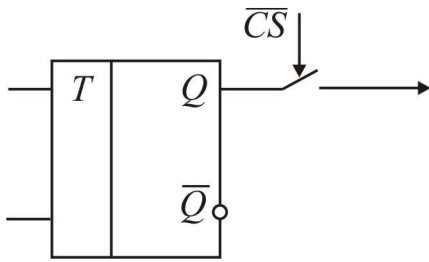


Рисунок 16.4

Вихідний сигнал тригера Q з'явиться на виході лише при активному (у цьому випадку – нульовому) рівні сигналу CS . Якщо $CS = 1$, тригер переводиться у високоімпедансний стан. Вихід тригера є тристабільним, тобто може знаходитися в одному з трьох станів:

логічної одиниці, логічного нуля або у високоімпедансному. У кожний момент часу до системної шини мікропроцесорної системи під'єднано лише два модулі – той, що приймає, і той, що передає інформацію. Інші знаходяться у високоімпедансному стані.

Принцип магістральності і модульності дозволяють нарощувати керуючі і обчислювальні можливості МП через під'єднання інших модулів.

Принцип мікропрограмного керування полягає у можливості здійснення елементарних операцій – мікрокоманд (зміщення, пересилки інформації, логічних операцій). Певною комбінацією мікрокоманд можна створити набір команд, який максимально відповідатиме призначенню системи, тобто створити *технологічну мову*. У секційних процесорах набір мікрокоманд можна змінити, використовуючи інші мікросхеми пам'яті мікрокоманд.

Узагальнену структурну схему мікропроцесорної системи показано на рис. 16.5.

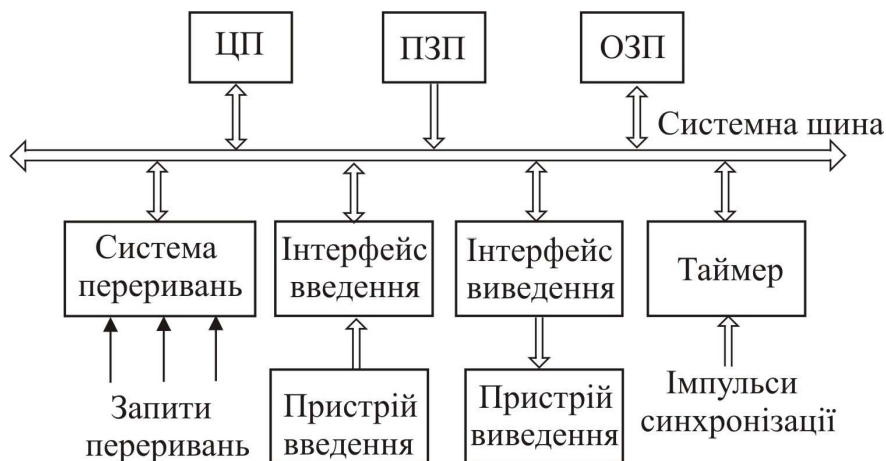


Рисунок 16.5

До складу мікропроцесорної системи керування входять: 1) центральний процесор (ЦП), 2) постійний запам'ятовувальний при-

стрій ПЗП, 3) оперативний запам'ятовувальний пристрій ОЗП, 4) система переривань, 5) таймер, 6) пристрій введення-виведення ПВВ. Пристрої введення-виведення під'єднані до системної шини через інтерфейси введення-виведення.

Постійний та оперативний запам'ятовувальні пристрої складають *систему пам'яті*, яка призначена для збереження інформації у вигляді двійкових чисел. Постійний запам'ятовувальний пристрій призначений для збереження програм керування таблиць, констант. ОЗП – для збереження проміжних результатів обчислень. Пам'ять організовано у вигляді масиву комірок, кожна з яких має свою адресу і містить байт або слово. Байтом називається група з 8 біт, а слово може мати будь-яку довжину в бітах. Найчастіше під словом розуміють двійкове число довжиною два байти. Для звернення до комірки пам'яті необхідно видати її адресу на шину адреси.

Сегментом називається область пам'яті, яка починається з будь-якої адреси, кратної 16, і займає до 64 кбайт. Існують три основних сегменти: 1) сегмент кодів, 2) сегмент даних, 3) сегмент стека.

Сегмент кодів містить коди команд, які адресуються сегментним регістром кодів *CS* та регістром – лічильником команд *IP*. Регістр *CS* визначає початкову адресу сегмента кодів, а регістр *IP* – зміщення в сегменті (відстань від початку сегмента до комірки, в якій знаходиться адреса команди).

Сегмент даних містить дані, константи та робочі області, необхідні для виконання програми. Регістр *DS* містить початкову адресу сегмента даних, а зміщення в сегменті задається в команді.

Сегмент стека містить адреси повернення з підпрограм та дані. Регістр *SS* містить початкову адресу сегмента стека, а регістр *SP* – зміщення в сегменті.

Деякі операції використовують *додатковий сегмент даних*, початкова адреса якого задається регістром *ES*, а зміщення в сегменті визначається командою.

Двобайтове зміщення (16 біт) може знаходитися в межах від 0000_{16} до $FFFF_{16}$. Для звернення до будь-якої адреси у програмі виконується додавання адрес, які знаходяться в регістрі сегмента та зміщення. Напри-

клад, перший байт у сегменті кодів має зміщення нуль, другий байт – одиницю і т.д. до $FFFF_{16}$.

Конкретна адреса команди (для сегмента кодів), комірки пам'яті (для сегмента даних та додаткового сегмента) або комірки стека (для сегмента стека) визначається результатом додавання адреси сегмента, яка міститься у відповідному сегментному реєстрі, та зміщення.

Модуль центрального процесора здійснює обробку даних і керує усіма іншими модулями системи. Центральний процесор, крім великої інтегральної схеми МП, містить схеми синхронізації та інтерфейсу із системною шиною. Він вибирає коди команд з пам'яті, дешифрує їх і виконує. Впродовж часу виконання команди – *командного циклу*, ЦП виконує такі дії:

- виставляє адресу команди на шину адреси АВ;
- отримує код команди з пам'яті та дешифрує його;
- обчислює адреси операнда і зчитує дані;
- виконує операцію, визначену командою;
- сприймає зовнішні керуючі сигнали (наприклад, запити переривань);
- генерує сигнали стану і керування, необхідні для роботи пам'яті та ПВВ.

Пристрої введення-виведення або зовнішні пристрої – це пристрої, призначені для введення інформації у МП або виведення інформації з нього. Прикладами ПВВ є дисплеї, друкувальні пристрої, клавіатура, цифро-аналоговий та аналого-цифровий пристрої, реле, комутатори. Для з'єднання ПВВ з системною шиною їх сигнали повинні відповідати певним стандартам. Це досягається за допомогою інтерфейсів введення-виведення.

Інтерфейси введення-виведення називають також контролерами або адаптерами. Мікропроцесор звертається до інтерфейсів за допомогою спеціальних команд введення-виведення. При цьому МП виставляє на шину адреси АВ адресу інтерфейсу, а по шині даних DB зчитує дані з пристрою введення або записує у пристрій виведення. На рис. 16.5 показано один інтерфейс введення і один інтерфейс виведення.

Система переривань дозволяє мікропроцесорній системі реагувати на зовнішні сигнали – запити переривань, джерелами яких можуть бути:

сигнали готовності від зовнішніх пристроїв, сигнали від генераторів, сигнали з виходів датчиків. З появою запиту переривання ЦП перериває основну програму і переходить до виконання підпрограми обслуговування запиту переривання. Для побудови системи переривань мікропроцесорні комплекти (МПК) містять великі інтегральні схеми спеціальних програмованих контролерів переривань.

Таймер призначений для реалізації функцій, пов'язаних з відліком часу. Після того як МП завантажує в таймер число, яке задає частоту, затримку або коефіцієнт ділення, таймер реалізує необхідну функцію.

16.5. Архітектура мікропроцесорів

Поняття *архітектури мікропроцесора* визначає його складові частини, а також зв'язки та взаємодію між ними. Архітектура містить: 1) структурну схему самого МП; 2) програмну модель МП (описання функцій регістрів); 3) інформацію про організацію пам'яті (ємність пам'яті та способи її адресації); 4) опис організації процедур введення-виведення.

Існують два основних типи архітектури – фоннейманівська та гарвардська. *Фоннейманівську архітектуру* (рис. 16.6, а) запропонував 1945 р. американський математик Джон фон Нейман. Особливістю цієї архітектури є те, що програма і дані знаходяться у спільній пам'яті, доступ до якої здійснюється по одній шині даних і команд.

Гарвардську архітектуру реалізовано у 1944 р. в релейній обчислювальній машині Гарвардського університету (США). Особливістю цієї архітектури є те, що пам'ять даних і пам'ять програм розділені і мають окремі шини даних і шину команд (рис 16.6, б), що дозволяє підвищити швидкодію МП системи.

Структурні схеми обох архітектур містять: процесорний елемент, пам'ять, інтерфейси введення/виведення (ІВВ) і ПВВ. Пам'ять і ІВВ для різних типів МП можуть бути як внутрішніми, тобто розміщуватися на тому ж кристалі, що і процесорний елемент, так і зовнішніми.

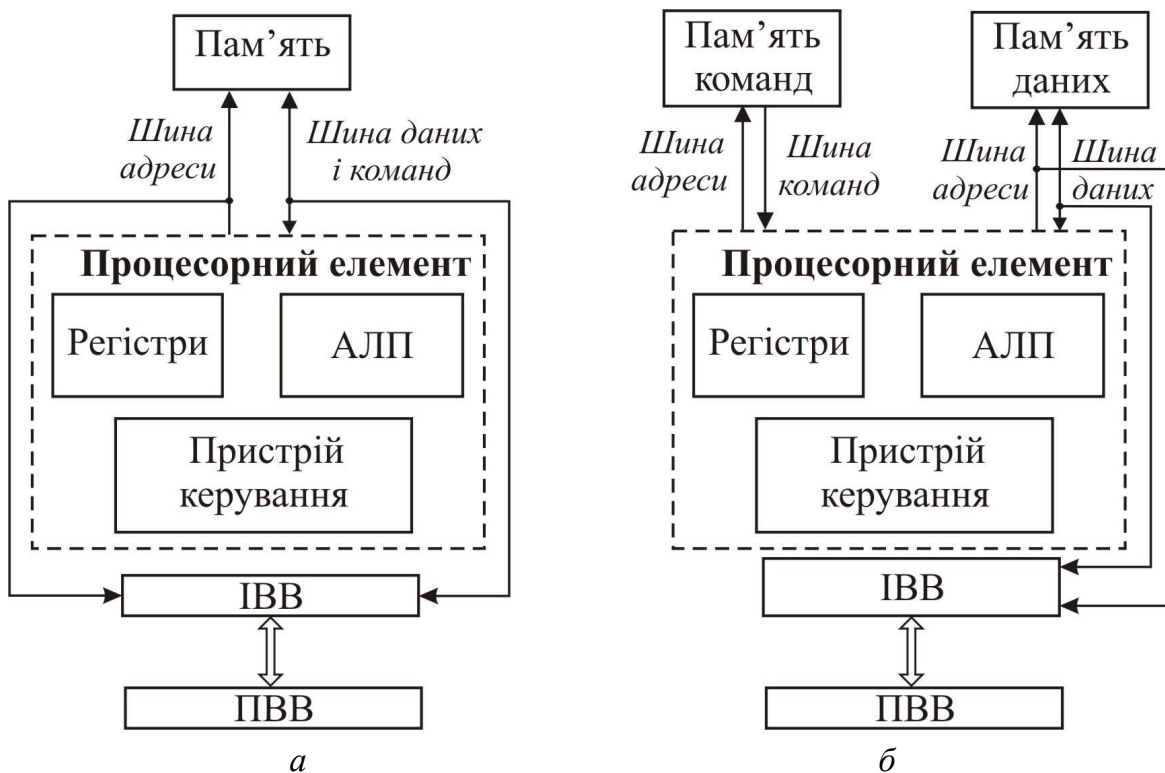


Рисунок 16.6

Процесорний елемент містить регістри, арифметично-логічний пристрій (АЛП), пристрій керування і виконує функції обробки даних та керування процесами обміну інформації. Пам'ять забезпечує зберігання кодів команд програми і даних. Інтерфейси призначені для зв'язку з ПВВ (наприклад, з клавіатурою, дисплеєм, друкувальними пристроями, датчиками інформації). Усі елементи структурної схеми з'єднані за допомогою шин.

16.6. Побудова мікропроцесорних систем з використанням мікропроцесорних комплектів

Всі елементи мікропроцесорів із програмною логікою – операційний пристрій, пам'ять, що керується і блок мікропрограмного керування – можуть розміщуватися на одному кристалі, тобто весь мікропроцесор може бути виконаний у вигляді одної мікросхеми. Так реалізовано мікропроцесори у вітчизняних серіях мікропроцесорних комплектів КР580 і КР1810. Керуюча пам'ять мікропроцесорів такого типу зберігає набір

мікропрограм, описаний в неї вже на етапі виготовлення мікросхеми на заводі. Кожна мікропрограма являє собою послідовність мікрокоманд, що забезпечує виконання деякої нескладної операції. При надходженні в мікропроцесор команди з операційного пристрою в пам'ять, що керується, знаходиться відповідна команді мікропрограма і шляхом послідовного зчитування її мікрокоманд здійснюється прийом з операційного пристрою операндів, виконання над ними деяких найпростіших дій і виклик з операційного пристрою чергової команди. Застосування процесора, виконаного на одній мікросхемі, спрощує побудову мікропроцесорної системи, скорочує число використовуваних у ній елементів, також спрощується процес програмування, через те що програмісту не потрібно записувати виконувани у кожному такті мікрокоманди.

Таке полегшення програмування супроводжується істотним зниженням швидкості вирішення задачі. Це пов'язано з тим, що система команд, якою забезпечується мікропроцесор при його заводському виготовленні, є універсальною у тому сенсі, що вона дозволяє програмувати розв'язання будь-якої задачі. Але при вирішенні конкретної задачі така фіксована система команд може виявитися неефективною: при користуванні нею виникне потреба у великій кількості команд, на виконання яких мікропроцесор буде витратити багато часу. Програма виявляється більш ефективною (потребує меншої ємності пам'яті для її збереження і меншого часу для виконання), якщо для її побудови використовується спеціально підібрана для даної конкретної задачі система команд. Такий спосіб із введенням нових складених програмістом команд (тобто модифікація системи команд) виявляється неможливим у мікропроцесорах, реалізованих у вигляді одної мікросхеми. Розглянемо один з мікропроцесорних комплектів.

Мікропроцесорний комплект серії КР580 містить набір великих інтегральних схем для побудови мікропроцесорних систем невисокої швидкодії, що працюють з тактовою частотою до 2,5 МГц. В основному на МПК даної серії будуються мікропроцесорні системи, що вирішують задачі, пов'язані з керуванням різноманітними технологічними процесами. В табл. 16.1 приведено склад МПК серії КР580.

Таблиця 16.1 – Склад мікропроцесорного комплексу серії КР580

Тип мікросхеми	Найменування мікросхеми	Виконувана функція
КР580ВМ80А	8-розрядний паралельний центральний процесор (CPU)	Центральний процесор з фіксованою системою команд для обробки паралельної 8-розрядної інформації
КР580ВВ51А	Програмований послідовний інтерфейс (УСАПП)	Універсальний синхронно-асинхронний приймально-передавальний пристрій послідовного зв'язку
КР580ВВ55А	Програмований паралельний інтерфейс (ППІ)	Програмоване введення-виведення паралельної інформації різного формату
КР580ВІ53	Програмований таймер	Формує програмно-керовані тимчасові затримки для синхронізації керованих об'єктів в реальному масштабі часу
КР580ВТ57	Програмований контролер прямого доступу до пам'яті (ПКДП)	Високошвидкісний обмін інформацією між пам'яттю МПС і периферійними пристроями
КР580ВН59	Програмований контролер переривань (ПКП)	Обслуговує до восьми запитів на перериванні від зовнішніх пристроїв
КР580ГФ24	Генератор тактових імпульсів (ГІ)	Формує дві послідовності тактових імпульсів, необхідні для роботи центрального процесора
КР580ВК28 КР580ВК38	Системний контролер	Формує сигнали, призначені для керування різними пристроями, що входять до МПС
КР580Ва86 КР580ВА87	Шинний формувач	Двонапрямковий 8-розрядний шинний формувач з високою навантажувальною здатністю і трьома станами
КР580ІР82 КР580ІР83	Буферний регістр	8-розрядний буферний регістр з трьома станами
КР580ВГ75	Програмований інтерфейс електронно-променевої трубки	Контролер виведення інформації з пам'яті МПС на екран електронно-променевої трубки
КР580ВВ79	Програмований інтерфейс клавіатури і дисплея	Контролер введення-виведення для клавіатури і дисплея
КР580ВК91А	Інтерфейс мікропроцесор – канал загального користування	Пристрій сполучення МП з інформаційно-вимірювальною системою
КР580ВА93	Приймач мікропроцесор – канал загального користування	Програмований приймач

Комплект має наступні особливості. У ньому передбачена велика інтегральна схема центрального процесора, що містить в одній мікросхемі операційний і керуючий пристрої. Це істотно спрощує побудову

мікропроцесорної системи. Крім того, для полегшення програмування при керуванні мікросхемами МПК застосовується фіксований набір команд. Однак використання такого фіксованого набору команд знижує швидкодію мікропроцесорної системи. Це пов'язано з тим, що запропонований користувачу стандартний набір команд може виявитися погано пристосованим для вирішення конкретної задачі.

Усі мікросхеми МПК серії КР580 призначені для роботи в діапазоні температур $-10\dots+70^{\circ}\text{C}$. Мікросхема центрального процесора КР580ВМ80А вимагає три джерела напруги живлення: $+12\text{ В} \pm 5\%$, $+5\text{ В} \pm 5\%$, $-5\text{ В} \pm 5\%$; мікросхема генератора тактових імпульсів КР580ГФ24 – два джерела: $+12\text{ В} \pm 5\%$, $+5\text{ В} \pm 5\%$; усі інші мікросхеми – одне джерело $+5\text{ В} \pm 5\%$.

16.7. Загальні поняття про мікроЕОМ

МікроЕОМ призначені передусім для заміни спеціалізованих логічних схем і застосовуються як складова частина різних інформаційно-керуючих систем.

На разі можна виділити такі типи мікроЕОМ, на основі яких можна побудувати багатомашинні й мультимікропроцесорні обчислювальні системи:

- *Керуючі вбудовані мікроЕОМ*. Вони застосовуються для вирішення локальних задач керування об'єктами і можуть використовуватися як контролери пристроїв, що під'єднуються до великої ЕОМ, або як керуючі машини нижніх контурів керування;

- *Керуючі мікроЕОМ*. Призначені для побудови систем керування досить складними об'єктами або процесами: технологічними лініями, вимірювальними комплексами тощо;

- *Обчислювальні інженерні мікроЕОМ*. Вони призначені для індивідуального використання. Зовнішні пристрої такої ЕОМ можуть вбудовуватися в корпус машини, а їх комплект містить мінімально необхідні пристрої для обчислювальних робіт та обробки даних: цифрову, алфавітно-цифрову та функціональну клавіатуру, алфавітно-цифровий

індикатор, друкувальний пристрій, зовнішній запам'ятовувальний пристрій.

Поява мікропроцесорних комплектів великих інтегральних схем спричинила появу принципово нових напрямів застосування цифрової обчислювальної техніки і дозволила здійснювати вбудоване керування, розподілене керування, розподілені обчислення.

Одним з різновидів мікроЕОМ є калькулятори. Мікропроцесор як прилад з високим ступенем інтеграції з погляду технології є результатом удосконалення калькулятора, виконаного на окремому кристалі. Деякі великі інтегральні схеми, що називаються мікропроцесорами, призначені насамперед для калькуляторів. Калькулятори поділяються на прості та програмовані.

Прості калькулятори призначаються для проведення найпростіших обчислень (рис. 16.7). Вони можуть обробляти, враховуючи незначну інформаційну ємність запам'ятовувального пристрою, тільки обмежену множину чисел.

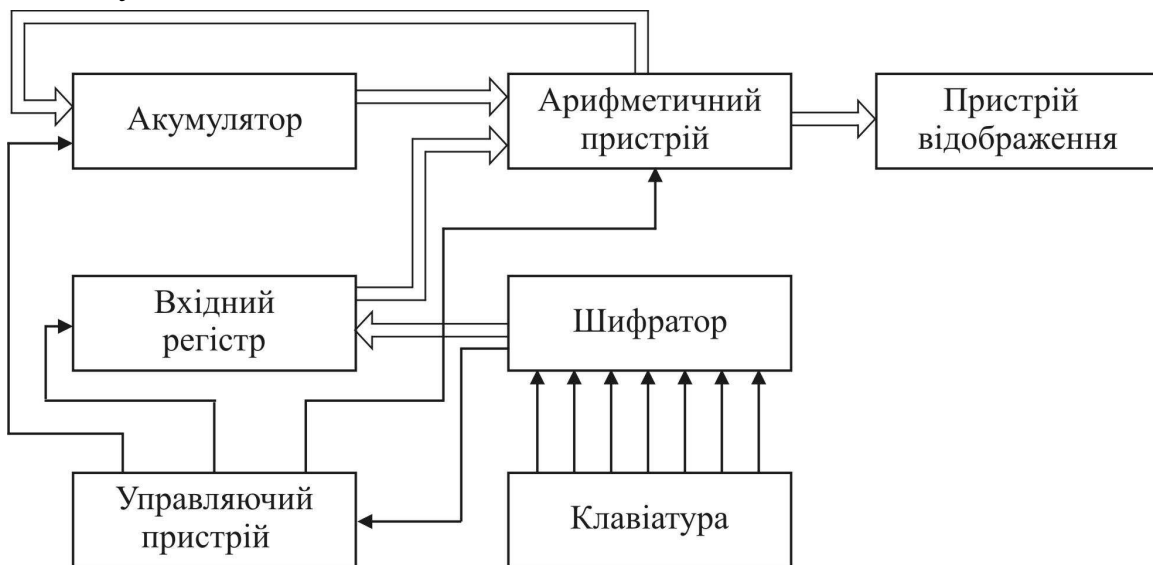


Рисунок 16.7

Непрограмований простий калькулятор містить два регістри: вхідний та акумулятор. Арифметичні операції виконуються в арифметичному пристрої над числами, які надходять з цих двох регістрів. Результати зберігаються в акумуляторі, вміст якого можна подати на пристрій відображення. Клавіатура забезпечує можливість введення чисел та символів операцій, тобто команд, які повинні бути виконані над заданими числами.

Програмований калькулятор містить дві області пам'яті: одну – для зберігання даних (початкових і результатів проміжних обчислень), іншу – для запису програми, тобто послідовності керуючих команд або операцій, які необхідно виконати над даними (рис. 16.8). Інформаційна ємність пам'яті може бути обрана оптимальною для даної задачі.

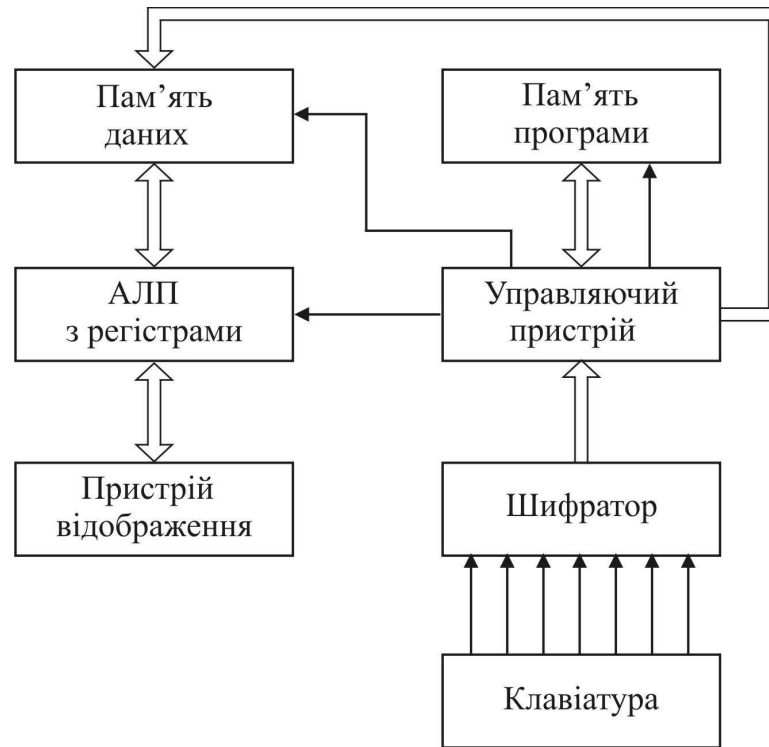


Рисунок 16.8

Програма вводиться з клавіатури через шифратор і керуючий пристрій у пам'ять програми, а вхідні дані – в пам'ять даних. У режимі виконання програми, який задається з клавіатури, коди команд послідовно вибираються з пам'яті програми і надходять у керуючий пристрій. На основі цих кодів керуючий пристрій виробляє сигнали керування, які, надходячи на різні пристрої калькулятора, забезпечують виконання записаної програми.

Калькулятор може бути корисною складовою частиною керуючої або обчислювальної системи. Однак його використання обмежено діапазоном виконуваних арифметичних операцій.

МікроЕОМ виконують великий набір операцій, мають чималий комплект периферійного обладнання і тому широко використовуються в різних галузях народного господарства.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке мікропроцесори? Наведіть структурну схему і поясніть роботу мікропроцесорної системи.
2. Що таке однокристальний і багатокристальний мікропроцесор?
3. Що таке біт, розряд, машинне слово, байт?
4. Наведіть структурну схему і поясніть роботу мікропроцесора.
5. Назвіть три основні вузли мікропроцесора. Яким чином здійснюється зв'язок між ними?
6. Що таке арифметико-логічний пристрій і для чого він потрібен?
7. Назвіть основні шини в мікропроцесорі і поясніть їх призначення.
8. Назвіть основні регістри в мікропроцесорі і поясніть їх призначення.
9. Що таке лічильник команд? Поясніть його роботу.
10. Що таке регістр ознак або регістр прапорців? Поясніть його роботу.
11. Що таке регістр станів? Поясніть його роботу.
12. Що таке регістри загального призначення? Поясніть їх роботу.
13. Що таке стекові регістри? Поясніть їх роботу.
14. Що таке генератор тактових імпульсів? Яке його призначення?
15. Назвіть систему команд мікропроцесора та поясніть їх призначення.
16. Наведіть і поясніть узагальнену структурну схему команди мікропроцесора.
17. Назвіть основні команди арифметичних і логічних операцій.
18. Яке призначення і принцип роботи команд пересилок?
19. Яке призначення і принцип роботи команд управління?
20. Поясніть основні принципи побудови мікропроцесорних систем.
21. Наведіть і поясніть узагальнену структурну схему мікропроцесорної системи керування
22. Що таке мікроЕОМ? Назвіть основні їх типи.
23. Наведіть структурну схему простого калькулятора та поясніть його роботу.
24. Наведіть структурну схему програмованого калькулятора та поясніть його роботу.
25. Назвіть галузі і сфери застосування мікроЕОМ, програмованого та простого калькуляторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Блажкин А. Т. Общая электротехника : учеб. пособие для вузов / А. Т. Блажкин, В. А. Бессекерский, Б. В. Фролов и др.; под ред. А. Т. Блажкина. – Л. : Энергия, Ленингр. Отд-ние, 1979. – 479 с.
2. Трегуб А. П. Электротехника / А. П. Трегуб; под ред. Е. В. Кузнецова. – Київ: Вища шк., 1987. – 600 с.
3. Касаткин А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, В. М. Немцов. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 440 с.
4. Милых В. И. Электрические цепи : учеб. пособие / В. И. Милых. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 159 с.
5. Електротехніка : навч. посібник для самостійної роботи студентів / В. Г. Данько, В. І. Мілих, А. К. Черкасов та ін. – Київ: УМК ВО, 1990. – 264 с.
6. Мілих В. І. Електротехніка та електромеханіка : навч. посібник / В. І. Мілих. – Київ: Каравела, 2005. – 376 с.
7. Милых В. И. Магнитные цепи и электротехнические устройства : учеб. пособие / В. И. Милых. – Харків: НТУ «ХПИ», 2003. – 184 с.
8. Збірник задач з електротехніки : навч. посіб. / В. Г. Данько, В. І. Мілих, Ф. Т. Карпенко, В. С. Марков. – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – 119 с.
9. Мілих В. І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В. І. Мілих, О. О. Шавьолкін; за ред. В. І. Мілих. – Київ: Каравела, 2007. – 688 с.
10. Малинівський С. М. Загальна електротехніка : підручник / С. М. Малинівський. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 640 с.
11. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники / И. П. Степаненко – М. : Совет. радио, 1980. – 424 с.
12. Гусев В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. шк., 1982. – 495 с.
13. Гилмор Ч. Введение в микропроцессорную технику / Ч. Гилмор. – М. : Мир, 1984. – 334 с.
14. Жеребцов И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 382 с.

15. Криштафович А. К. Основы промышленной электроники / А. К. Криштафович, В. В. Трифонюк. – М. : Высш. шк., 1985. – 288 с.
16. Руденко В. С. Основы промышленной электроники / В.С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ: Вища школа, 1985. – 400 с.
17. Основы промышленной электроники / В. Г. Герасимов, О. М. Князьков, А. Е. Краснопольский и др.; под ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1986. – 336 с.
18. Морозов А. Г. Электротехника, электроника и импульсная техника / А. Г. Морозов. – М. : Высш. шк., 1987. – 448 с.
19. Справочник по микропроцессорным устройствам / А. А. Молчанов, В. И. Корнейчук, В. П. Тарасенко и др. – Киев: Техника, 1987. – 228 с.
20. Гершунский Б. С. Основы электроники и микроэлектроники / Б. С. Гершунский. – Киев: Вища школа, 1987. – 422 с.
21. Галкин В. И. Промышленная электроника / В. И. Галкин. – Минск: Высш. шк., 1989. – 336 с.
22. Руденко В. С. Промислова електроніка / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. – Київ: Либідь, 1993. – 432 с.
23. Корнеев В. В. Современные микропроцессоры / В. В. Корнеев, А. В. Киселев. – М. : НОЛИДЖ, 1998. – 240 с.
24. Мікропроцесорна техніка / Ю. І. Якименко, Т. О. Терещенко, Є. І. Сокол та ін.; за ред. Т. О. Терещенка. – Київ: Вид-во «Політехнік», 2003. – 440 с.
25. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки / Ф. П. Шкрабець, Д. В. Ципленков, Ю. В. Куваєв та ін. – Дніпропетровськ: ДНГУ, 2004. – 515 с.
26. Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков; за ред. А. Г. Соскова. – Київ: Каравела, 2004.– 432 с.
27. Долбня В. Т. Електроніка і мікросхемотехніка / В. Т. Долбня, Ю. Д. Сакара, Т. В. Миланіч. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – 204 с.
28. Болюх В. Ф. Основы електроніки та мікропроцесорної техніки : навч. посібник / В. Ф. Болюх, В. Г. Данько. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	5
Розділ 1. ОСНОВИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ	8
1.1. Загальні поняття електричних кіл	8
1.1.1. Основні функціональні елементи електричного кола	9
1.1.2. Загальні параметри функціональних елементів	9
1.1.3. Подання електричного кола у вигляді електричних схем	11
1.1.4. Геометричні поняття електричного кола	12
1.1.5. Умовно-позитивні напрямки електричних величин	12
1.2. Електричні кола постійного струму	13
1.2.1. Закони Ома і Кірхгофа у колі постійного струму	13
1.2.2. Еквівалентні перетворення	15
1.2.3. Розрахунок складних електричних кіл	17
1.2.4. Потужність у колі постійного струму	23
1.2.5. Джерело ЕРС у колі постійного струму	23
Розділ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ	27
2.1. Параметри синусоїдного змінного струму	28
2.2. Середнє і діюче значення змінного струму	30
2.3. Отримання синусоїдного змінного струму	32
2.4. Подання синусоїдного змінного струму векторами і комплексними числами	33
2.5. R, L, C у колі змінного струму	35
2.6. Закони Ома й Кірхгофа в колі змінного струму	37
2.7. Послідовне з'єднання R, L, C	38

2.8.	Паралельне з'єднання R, L, C	40
2.9.	Баланс потужності у колі змінного струму	41
2.10.	Резонанс у колі змінного струму	42
Розділ 3. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА		46
3.1.	Трифазне джерело ЕРС	46
3.2.	Підключення споживачів до трифазної лінії електропередачі ..	49
3.3.	Потужність у трифазному колі	53
Розділ 4. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ		55
4.1.	Закони комутації	55
4.2.	Загальні принципи аналізу перехідних процесів	56
4.3.	Вмикання котушки індуктивності у коло постійного струму ...	57
4.4.	Вимикання котушки індуктивності з кола постійного струму .	58
4.4.1.	Пряме вимикання	58
4.4.2.	Вимикання з розрядним резистором	60
4.5.	Підключення індуктивної котушки до джерела синусоїдної напруги	62
4.6.	Зарядка конденсатора	64
4.7.	Розрядка конденсатора на резистор	65
4.8.	Розрядка конденсатора на котушку індуктивності	65
Розділ 5. МАГНІТНЕ ПОЛЕ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ .		69
5.1.	Магнітне коло	69
5.2.	Магнітні властивості матеріалів.....	71
5.3.	Закони, пов'язані з магнітними полями	73
5.3.1.	Закон електромагнітної індукції.....	73
5.3.2.	Закон Ампера.....	74
5.4.	Класифікація магнітних кіл.....	75
5.5.	Аналогія між електричними і магнітними колами	76

5.6.	Принцип розрахунку магнітних кіл постійного струму	78
5.7.	Енергія магнітного поля	79
5.8.	Силова дія магнітного поля	80
5.8.1.	Правило лівої руки	80
5.8.2.	Силова взаємодія двох провідників зі струмом	80
5.8.3.	Сила тяжіння магніту	80
5.9.	Індукційна дія магнітного поля	81
5.10.	Котушка з осердям у колі змінного струму	82
5.11.	Втрати потужності в осерді котушки змінного струму	84
Розділ 6. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ		87
6.1.	Дроселі	87
6.1.1.	Дросель з регульованим повітряним проміжком	87
6.1.2.	Дроселі насичення	89
6.2.	Електромагніти силові	90
6.3.	Комутаційні, пускорегулювальні та захисні апарати	91
6.3.1.	Контактори	92
6.3.2.	Реле захисні	93
6.3.3.	Повітряні автоматичні вимикачі	95
Розділ 7. ТРАНСФОРМАТОРИ		99
7.1.	Види трансформаторів	99
7.2.	Будова і принцип дії однофазного трансформатора	101
7.3.	Робота трансформатора при навантаженні	104
7.4.	Визначення параметрів спрощеної схеми заміщення трансформатора	106
7.4.1.	Дослід холостого ходу (неробочий режим)	106
7.4.2.	Дослід короткого замикання	107
7.4.3.	Раптове коротке замикання	108

7.5.	Експлуатаційні характеристики однофазного трансформатора	108
7.5.1.	Зовнішня характеристика	108
7.5.2.	Характеристика ККД	109
7.6.	Трифазні трансформатори	109
7.7.	Автотрансформатори	112
7.8.	Вимірювальні трансформатори	113
7.8.1.	Вимірювальний трансформатор струму	113
7.8.2.	Вимірювальний трансформатор напруги	115
Розділ 8.	ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ	118
8.1.	Види потужності в електричній машині	118
8.2.	Види електричних машин	119
Розділ 9.	ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	121
9.1.	Будова та принцип дії машини постійного струму	121
9.2.	Способи збудження електричної машини постійного струму .	125
9.3.	Втрати та ККД машини постійного струму .	125
9.4.	Реакція якоря та комутація машини постійного струму	127
9.5.	Характеристики генераторів постійного струму	129
9.5.1.	Генератори з незалежним та паралельним збудженням	129
9.5.2.	Генератор зі змішаним збудженням	132
9.6.	Двигуни постійного струму. Саморегулювання	133
9.7.	Пуск двигуна постійного струму	134
9.8.	Регулювання обертів двигуна	134
9.9.	Робочі характеристики двигунів постійного струму	135
9.9.1.	Двигун з паралельним збудженням	136
9.9.2.	Двигун з послідовним збудженням	137
9.9.3.	Двигун зі змішаним збудженням	139

Розділ 10. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ	143
10.1. Асинхронні електричні машини	145
10.2. Типи роторів асинхронного двигуна	147
10.3. Енергетична діаграма асинхронного двигуна	148
10.4. Синхронні електричні машини	153
Розділ 11. ЕЛЕКТРОНІКА	159
11.1. Напівпровідникові матеріали	160
11.2. Напівпровідникові прилади	162
11.2.1. Напівпровідникові резистори	163
11.2.2. Напівпровідникові діоди	165
11.2.3. Транзистори	168
11.2.4. Польові транзистори	171
11.2.5. <i>IGBT</i> -транзистори	172
11.2.6. Тиристори	173
Розділ 12. ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЖИВЛЕННЯ	177
12.1. Випрямлячі	177
12.2. Однофазні некеровані випрямлячі	178
12.3. Трифазні некеровані випрямлячі	180
12.4. Згладжувальні фільтри	183
12.5. Ємнісний фільтр	183
12.6. Індуктивний фільтр	184
12.7. Стабілізатор напруги на стабілітроні	185
12.8. Керовані випрямлячі	185
12.9. Інвертори	187
Розділ 13. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ	191
13.1. Температурна стабілізація підсилювального каскаду	194
13.2. Режими роботи підсилювального каскаду	195

13.3. Амплітудно-частотні характеристики електронних підсилювачів	200
Розділ 14. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ	204
Розділ 15. ЕЛЕМЕНТИ ЦИФРОВОЇ І МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ	213
Розділ 16. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО МІКРОПРОЦЕСОРНУ ТЕХНІКУ	220
16.1. Загальні відомості про мікропроцесори	220
16.2. Структура мікропроцесора	222
16.3. Система команд мікропроцесора	225
16.4. Принципи побудови мікропроцесорних систем	228
16.5. Архітектура мікропроцесорів	232
16.6. Побудова мікропроцесорних систем з використанням мікропроцесорних комплектів	233
16.7. Загальні поняття про мікроЕОМ	236
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	240

Навчальне видання

БОЛЮХ Володимир Федорович
ДАНЬКО Володимир Григорович
ГОНЧАРОВ Євген Вікторович

**ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ
ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ**

Навчальний посібник

За редакцією проф. *В. Г. Данька*

Відповідальний за випуск *К. В. Коритченко*
Роботу для видання рекомендував *В. В. Воїнов*

Комп'ютерний набір та верстка *Е. Т. Кирпильова*

В авторській редакції.

План 2018 р., поз. 127

Підп. до друку 05.02.19. Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетн.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. . Наклад ___ прим. Зам. №
Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
