ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Кафедра інформаційних систем та технологій

В.А. ДРУЖИНІН
С.В. ТОЛЮПА
Ю.М. БОЙКО

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА
КУРС ЛЕКЦІЙ

Навчальний посібник

для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр»

спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

освітньої програми «Програмні технології інтернет речей»

Київ 2024

Рецензенти:

д.т.н, доцент, завідувач спеціальної кафедри Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського" Ігор Субач;

к.т.н, генеральний директор ООО «ІТЦ «Хай-Тек Бюро Гребенюк Олексій Володимирович»;

к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій КПІ ім. Ігоря Сікорського Цьопа Наталія Володимирівна;

к.т.н., доцент, доцент кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем КНУ ім. Тараса Шевченка Жиров Геннадій Борисович.

Рекомендовано до публікації кафедрою інформаційних систем та технологій, протокол № 14_23/24 від «23» квітня 2024 року.
Затверджено Вченою радою факультету інформаційних технологій, протокол № 16 від 28.06.2024 року.

В.А. Дружинін, С.В. Толюпа, Ю.М. Бойко

Електротехніка та електроніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» освітньої програми «Програмні технології інтернет речей» **уклад.:** В.А. Дружинін, С.В. Толюпа, Ю.М. Бойко – К.: КНУ імені Тараса Шевченка, 2024. – 85 с.

У навчальному посібнику **«Електротехніка та електроніка. Курс лекцій»** викладено відомості про основи теорії кіл, трифазні електричні кола, електронні напівпровідникові прилади та електронні пристрої.

Електронна версія цього видання опублікована на сайті кафедри інформаційних систем та технологій факультету інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

© В.А. Дружинін, С.В. Толюпа, Ю.М. Бойко 2024

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ 5
ВСТУП 6
РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ 7
Тема 1.1. Основні поняття і закони з електричних і магнітних кіл 7
Лекція 1. Електротехнічні пристрої постійного струму та області їх застосування. Елементи електричних кіл. Джерела і споживачі електричної енергії. Пасивні і активні двополюсники та схеми їх заміщення. Нерозгалужені та розгалужені електричні кола. Закон Ома для пасивної та активної ділянки кола. Визначення напруги між точками електричного кола. 7
Список питань для самоконтролю 15
Тема 1.2. Електричні кола постійного струму
Лекція 2. Розрахунок простих розгалужених кіл на підставі закону Ома та еквівалентного опору. Закони Кірхгофа. Закон Джоуля-Ленца. Розрахунок складних кіл за рівняннями Кірхгофа. Баланс потужності. Метод вузлових потенціалів. Аналіз електричного стану складних кіл методом накладання струмів; методом еквівалентного генератора; методами еквівалентних перетворень. 16
Список питань для самоконтролю 22
Тема 1.3. Електричні кола однофазного синусоїдного струму 23
Лекція 3. Причини широкого розповсюдження електричних пристроїв синусоїдного струму промислової частоти. Основні параметри, що характеризують синусоїдну функцію. Способи зображення функції. Ідеальний резистор у колі синусоїдного струму. Ідеальна котушка у колі синусоїдного струму. Ідеальний конденсатор у колі синусоїдного струму.

Лекція 4. Рівняння електричного стану кола з послідовним з'єднанням резистора, індуктивної котушки та конденсатора. Векторна діаграма кола. Трикутник напруг. Трикутник опорів. Резонанс напруг. Практичне застосування резонансу напруг. Рівняння електричного стану кола з паралельним з'єднанням резистора, індуктивної котушки та конденсатора. Векторна діаграма. Трикутник струмів. Трикутник провідностей. Резонанс струмів. Частотні та резонансні характеристики. Практичне застосування резонансу струмів. Розрахунок кіл синусоїдного струму методом комплексних чисел. 31
Список питань для самоконтролю 43
РОЗДІЛ 2. ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА 44
Тема 2.1. Трифазні електричні кола 44
Лекція 5. Трифазні електричні кола. Елементи трифазних кіл. Принцип дії трифазного генератора. Способи зображення симетричної системи ЕРС. Способи з'єднання фаз трифазного 44

джерела живлення. Трипровідна і чотирипровідна система. Фазні та лінійні напруги. Класифікація і способи ввімкнення споживачів у трифазне коло. Симетричні режими трифазного кола. Співвідношення між фазними та лінійними напругами і струмами при симетричних споживачах.

Список питань для самоконтролю 47

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОННІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ 48
Тема 3.1. Напівпровідникові переходи й контакти 48
Лекція 6. Електропровідність напівпровідників. Домішкові напівпровідники Явище *p-n* переходу та його властивості. Вольт-амперна характеристика *p-n* переходу Пробій *p-n* переходу. Ємності *p-n* переходу. 48
Список питань для самоконтролю 55
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ 56
Тема 4.1. Випрямлячі та перетворювачі 56
Лекція 7. Випрямлячі. Їх класифікація, галузі застосування. Структурна схема. 56
Список питань для самоконтролю 58
Тема 4.2. Підсилювачі та генератори 59
Лекція 8. Напівпровідникові підсилювачі. Класифікація та технічні показники. Транзисторні підсилювачі за схемою ЗБ, ЗЕ, ЗК. Температурна стабілізація. Зворотні зв’язки в підсилювачах. Підсилювачі постійного струму. 59

Список питань для самоконтролю 71

Тема 4.3. Дискретні електронні пристрої 72
Лекція 9. Диференційні каскади. Операційні підсилювачі. Інвертуючий підсилювач. Інвертуючий суматор. Загальна характеристика імпульсних пристроїв. Параметри імпульсних сигналів. Параметри послідовності імпульсів. Діодні ключі. Робота біполярного транзистора в ключовому режимі. Логічні елементи. Імпульсний режим роботи операційних підсилювачів. 72

Список питань для самоконтролю 84
Список рекомендованої літератури 85

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АС активна складова

БТ біполярні транзистори

ВАХ воль-амперна характеристика

ВЗ вільна зона

ДЕЕ джерело енергії

ЕК електричне коло

ЕРС електрорушійна сила

ЗП зона провідності

ОП операційний підсилювач

РП ективна потужність

СБ спільна база

СЕ спільний емітер

СК спільний колектор

ФП фотоперетворювач

Вступ

В умовах сьогодення стан інформаційних систем та технологій визначається постійним зростанням ролі електроніки в усіх сферах життєдіяльності.

За даними статистики, переважну частину від обсягу всієї світової промисловості займає саме електроніка.

У промисловості та побуті - скрізь майбутній фахівець у галузі інформаційних систем та технологій буде стикатися з електронними пристроями та системами, до яких належать: джерела живлення, починаючи від побутових випрямлячів, зарядних пристроїв, джерел безперервного живлення й закінчуючи потужними промисловими перетворювальними пристроями та системами; підсилювачі електричних сигналів; мікропроцесорні пристрої та системи керування різними об'єктами; пристрої зв'язку й телекомунікаційні системи; комп'ютерні системи загального та спеціального призначення.

Тому у запропонованому курсі лекцій з електротехніки та електроніки наведено відомості про основи теорії кіл, трифазні електричні кола, електронні напівпровідникові прилади та електронні пристрої.

Відомо [1-3], що електричні кола − це сукупність джерел і споживачів електричної енергії, комутаційної апаратури, вимірювальних приладів та з'єднувальних провідників.

В джерелах електричної енергії здійснюється перетворення в електричну енергію якої-небудь іншої форми енергії. В споживачах, навпаки, електрична енергія перетворюється в інші форми енергії, наприклад в механічну (двигуни постійного струму), теплову (електричні печі) і таке інше. Комутаційна апаратура, з'єднувальні провідники та вимірювальні прилади виконують функції передачі електричної енергії від джерел, розподілу її між споживачами і контролю режимів роботи всіх електротехнічних пристроїв.

Для зручності електричні кола зображують принциповими схемами в яких електротехнічні пристрої замінюються у відповідності до державних стандартів умовними позначками. Принципова схема електричного кола показує призначення та взаємодію електротехнічних пристроїв, але за її допомогою не завжди можна виконати розрахунок та аналіз режимів їх роботи. Тому електротехнічні пристрої подають схемами заміщення.

Матеріал викладено за принципом проблемного навчання, згідно з яким основна увага приділяється розв'язанню задач. Такий підхід забезпечує активне засвоєння теоретичного матеріалу і сприяє розвитку творчих здібностей майбутніх фахівців в галузі інформаційних технологій.

Розділ 1. Основи теорії кіл

Тема 1.1. Основні поняття і закони з електричних і магнітних кіл

Лекція 1. Електротехнічні пристрої постійного струму та області їх застосування. Елементи електричних кіл. Джерела і споживачі електричної енергії. Пасивні і активні двополюсники та схеми їх заміщення. Нерозгалужені та розгалужені електричні кола. Закон Ома для пасивної та активної ділянки кола. Визначення напруги між точками електричного кола.

Елементи електричних кіл. Схеми заміщення реальних електротехнічних пристроїв подаються за допомогою трьох ідеальних елементів, які позначають *R, L* і *C*. Умовні їх позначення та погоджені напрямки напруги на них і струму подані на рис. 1.1.

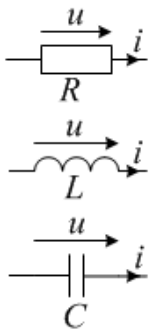


Рис. 1.1

Ідеальний резистивний елемент (опір) *R* − це елемент, що враховує в електричному колі незворотні процеси перетворення електричної енергії в інші види енергій, наприклад в теплову. По своїм властивостям до ідеального резистивного елемента близькі електрична лампа розжарювання, нагрівальні прилади та ін.

Ідеальні елементи *L* і *C* − це елементи, що враховують в електричному колі зворотні процеси перетворення електричної енергії відповідно в енергію магнітного поля та електричного. По своїм властивостям до ідеального індуктивного елемента близькі котушки реле, обмотки трансформаторів і електричних машин, а по своїм властивостям до ідеального ємнісного елемента близький конденсатор.

Властивості ідеальних елементів відображаються в рівняннях, які задають взаємозв’язок струму і напруги відповідного елемента.

Зв’язок між струмом і напругою ідеального резистивного елемента *R* описується законом Ома [4,5]:

$$u = R\,i, \text{ або } i=u/R.$$

В виразах *R* − опір резистивного елемента. Опір вимірюється в омах (Ом), а величина зворотна опору, називається провідністю: *G=1/R*. Одиниця виміру провідності Сіменс (*См)*.

Фізичним параметром котушок, намотаних на загал мідними ізольованими проводами, що використовуються в електротехнічних пристроях, є повний магнітний потік або потокозчеплення $\psi = L \cdot i$, де $L-$ індуктивність котушки. Індуктивність вимірюється в Генрі (*Гн*).

Якщо потокозчеплення буде змінюватись, то на затискачах котушки виникає напруга, пропорційна похідній в часі від потокозчеплення. За погодженими напрямками напруги і струму, що на рисунку, рівняння ідеального індуктивного елемента наступні [4,5]:

$$u = L\frac{di}{dt}, \text{ або } i = \frac{1}{L}\int u dt .$$

Відомо, що електричний заряд накопичений конденсатором, пропорційний напрузі на його обкладках: $Q = Cu$, де C − ємність конденсатора. Ємність вимірюється в фарадах (Ф).

Струм через конденсатор пропорційний похідній в часі від заряду і за погодженими напрямками напруги і струму, що на рисунку, рівняння ідеального ємнісного елемента наступні [4,5]:

$$i = C\frac{du}{dt}, \text{ або } u = \frac{1}{C}\int i dt .$$

Джерела електричної енергії в колах постійного струму. В колах постійного струму напрямок і сила струму під дією джерел електричної енергії остаються незмінними протягом всього часу спостереження.

Властивості джерел електричної енергії визначають за зовнішніми характеристиками − залежностями напруги на їх затискачах від струму джерел. Якщо джерело електричної енергії з електрорушійною силою (ЕРС) E та внутрішнім опором R_0 незмінні, то зовнішня характеристика лінійна і визначиться виразом $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = E - R_0 I$. Цьому виразу відповідає пряма 1 на рис. 1.2.

В багатьох випадках внутрішній опір джерел незначний відносно опору споживача. В таких випадках $R_0 I << E$ і напруга між затискачами джерела практично не залежить від струму, $U_{12} \approx const$.

Джерело з малим внутрішнім опором можна замінити ідеалізованим джерелом ЕРС з одним параметром E. Напруга між затискачами ідеалізованого джерела не залежить від струму і визначається виразом $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = E = const$, якому відповідає пряма 2 на рис. 1.2.

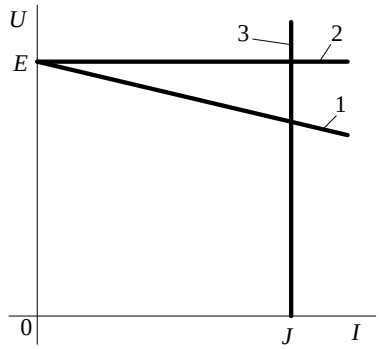


Рис. 1.2

В деяких випадках внутрішній опір джерела в багато разів більший за опір споживача, тобто $R_0 >> R$. Тоді струм джерела $I=E/(R_0+R)\approx E/R_0= J$. Таке джерело електричної енергії можна замінити ідеалізованим джерелом струму з одним параметром J. Струм джерела струму не залежить від опору споживача, а напруга на його затискачах змінюється в залежності від опору споживача і визначається виразом $U_{12} = R J$, якому відповідає пряма 3 на рис. 3.

Від схеми заміщення реального джерела енергії, поданого послідовним з'єднанням ідеалізованого джерела ЕРС E і внутрішнього опору R_0 (рис. 2, а), можна перейти до схеми заміщення з ідеалізованим джерелом струму, рис. 2, б. Для цього всі складові рівняння для джерела енергії, поданого послідовним з'єднанням ідеалізованого джерела ЕРС E і внутрішнього опору R_0, потрібно поділити на внутрішній опір джерела R_0. Будемо мати рівняння [4,5]:

$$E/R_0=J=U_{12}/R_0+I=I_0+I,$$

яке можна коментувати таким чином: струм джерела струму складається зі струму споживача I і струму I_0 внутрішнього опору, приєднаного до затискачів джерела.

Подані схеми заміщення реальних джерел електричної енергії є еквівалентні відносно зовнішніх ділянок електричних кіл, але не еквівалентні відносно енергетичних співвідношень, оскільки

$$R_0I^2\neq R_0I_0^2.$$

Основні закони електричних кіл. Закон Ома для одноконтурного електричного кола. Це найпростіше електричне коло, яке містить джерело електричної енергії з електрорушійною силою (ЕРС) E та внутрішнім опором R_0, споживача електричної енергії з опором R та з'єднуючої лінії з опором $R_л$ (опором з'єднуючої лінії за звичай нехтують), рис. 1.3. Якщо опори всіх елементів кола та ЕРС не залежать від будь-яких чинників, то їх, а також коло називають лінійними.

Електрорушійна сила E викликає струм того ж напрямку, який визначають за законом Ома [4,5]:

$$I = \frac{E}{R + R_л + R_0}.$$

Струм в лінійному одноконтурному електричному колі прямо пропорційний ЕРС джерела і обернено пропорційний загальному опору кола.

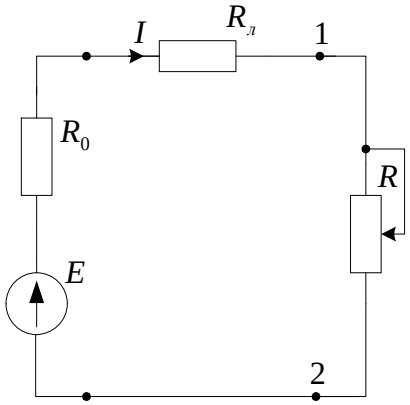


Рис. 1.3

Закон Ома для пасивної ділянки кола. Пасивною називають ділянку кола, що не має джерел енергії (ділянка 1−2, рис. 1.3). Закон Ома встановлює зв'язок між струмом і напругою на даній ділянці. Під напругою розуміють різницю потенціалів між крайніми точками цієї ділянки: $U_{12}=\varphi_1-\varphi_2$.

Нехай буде напрям струму від точки *1* до точки *2* (від точки з вищим потенціалом). Отже, потенціал точки *1* (φ_1) вище за потенціал точки 2 на величину R_2I: $\varphi_2=\varphi_1+R_2I$. Відповідно до визначення напруги $U_{12}=\varphi_1-\varphi_2=R_2I$, напруга на опорі дорівнює добутку струму опора на величину цього опору. Закон Ома часто записують у вигляді [4,5]:

$$I = \frac{U_{12}}{R}.$$

Напругу на опорі називають також спадом напруги. Позитивний напрям напруги на опорі, який показується стрілкою, співпадає з позитивним напрямом струму через цей опір. Згідно з визначенням напруги $U_{21} = \varphi_2-\varphi_1 = -U_{12}$, тобто зміна послідовності індексів рівносильна зміні знаку цієї напруги. Отже, напруга може бути і додатною і від'ємною.

Закон Ома для активної ділянки кола. Активною називають ділянку кола, яка має джерела енергії (рис. 1.4).

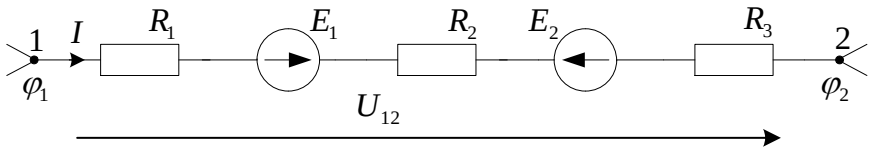


Рис. 1.4

Струм у такій ділянці кола залежить не тільки від різниці потенціалів на затискачах ділянки, але й від значення і напрямку ЕРС джерел.

Закон Ома дозволяє визначити струм активної ділянки, якщо відомі потенціали крайніх точок цієї ділянки і ЕРС джерел.

Вибираємо довільно додатний напрямок струму, наприклад, від точки 1 до точки 2 і в загальному вигляді маємо [4,5]:

$$\mathrm{I} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \sum E}{\sum R} = \frac{U_{12} + \sum E}{\sum R}.$$

При обчисленні ΣE зі знаком "+" враховують ЕРС, напрямок яких збігається з обраним додатним напрямком струму; зі знаком "–" ЕРС, напрямок яких протилежний напрямку струму. Для ділянки кола, показаної на рис. 5, маємо [4,5]:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Закони Кірхгофа. Перший закон Кірхгофа формулюють двояко:

1. Алгебраїчна сума струмів у будь-якому вузлі електричного кола дорівнює нулю (при цьому струми направлені у вузол враховують з одним знаком, а від вузла − з протилежним): $\Sigma I = 0$.

2. Сума струмів, що направлені у будь-який вузол електричного кола, дорівнює сумі струмів, що направлені від вузла.

Так, відносно до вузла 3 схеми рис. 1.5 маємо: згідно з першим формулюванням [4,5]

$$-I_3+I_4+J=0,$$

згідно з другим [4,5]

$$I_3=I_4+J.$$

Другий закон Кірхгофа також формулюється двояко:

1. Алгебраїчна сума ЕРС, які діють в будь-якому контурі електричного кола, дорівнює алгебраїчній сумі спаду напруг на всіх опорах цього контуру [4,5]:

$$\Sigma E = \Sigma IR\ .$$

(коли обчислюються ΣE, ΣIR зі знаком "+" враховують складові, яких напрямок ЕРС E і струму I співпадає з напрямком обходу контуру).

2. Алгебраїчна сума напруг, які діють у будь-якому контурі електричного кола, дорівнює нулю [4,5]:

$$\Sigma U=0\ .$$

Наприклад, для контуру R_1-E_1-R_3-E_4-R_4-R_5-E_5 схеми рис. 1.5 при обході його за обертанням годинникової стрілки згідно з першим формулюванням [4,5]:

$$E_1 - E_4 - E_5 = R_1 I_1 - R_3 I_3 - R_4 I_4 + R_5 I_5;$$

згідно з другим формулюванням [4,5]:

$$R_1 I_1 - U_{12} - R_3 I_3 + U_{34} - R_4 I_4 + R_5 I_5 + U_{67} = 0.$$

Визначення напруги між точками електричного кола. При розв'язанні багатьох задач виникає потреба обчислити напругу між різними

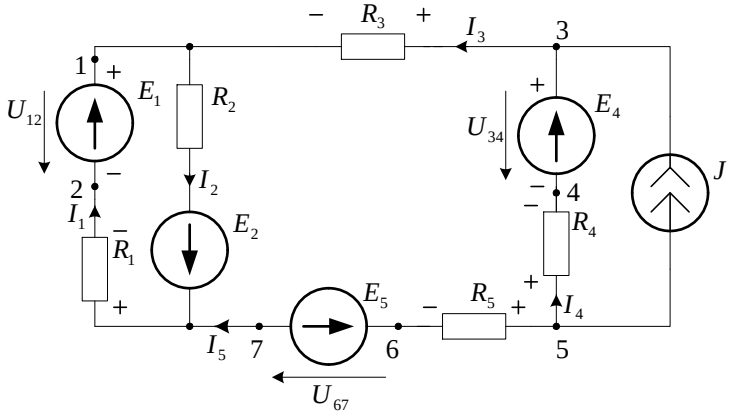


Рис. 1.5

точками кола. Для визначення напруги між точками, наприклад 1 і 2, потрібно пройти від точки 1 до точки 2 тим шляхом, де відомі опори, струми, ЕРС і обчислити зміну потенціалів на цьому шляху.

Слід пам'ятати, що ЕРС спрямована від від'ємного затискача джерела ("−") до додатного ("+") незалежно від напрямку струму через джерело; в

опорі струм завжди спрямований від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом.

Наприклад, у схемі рис. 1.5:

$$U_{35}=-R_4I_4+E_4,\ \ U_{57}=E_5+R_5I_5,\ \ U_{15}=-R_5I_5-E_5-R_1I_1+E_1.$$

Робота, потужність, Закон Джоуля − Ленца. Із курсу фізики відомо, що робота A по переміщенню додатного заряду уздовж нерозгалуженої ділянки електричного кола без джерел електричної енергії за час t визначається виразом [4,5] :

$$A=U\,I\,t,$$

де U та I − відповідно напруга між затискачами і струм зазначеної ділянки.

Якщо у відповідності закону Ома замінити U через RI одержимо вираз [4,5]:

$$A=R\,I^2\,t,$$

який експериментально установлено Джоулем і, незалежно від нього Ленцем. Цей вираз носить назву закону Джоуля − Ленца. Одиницею виміру роботи в системі СІ є джоуль (Дж), 1 Дж = 1 ВАс.

Для оцінки енергетичних умов в електричних колах важливо знати, як швидко виконується робота. Відношенням роботи A до відповідного проміжку часу t визначають потужність [4,5]:

$$P=A/t=UI=\ R\,I^2.$$

Одиницею виміру потужності в системі СІ є *ват* (Вт), *1 Вт = 1 Дж/с=1 ВА.*

Режими роботи джерела електричної енергії. В залежності від опору споживача R, розрізнюють такі режими роботи джерела напруги: неробочого ходу, номінальний, короткого замикання та узгоджений.

Режим неробочого ходу встановлюється, коли вимкнути опір R або ввімкнути безмежно великий опір. При цьому струм $I=0$, тобто струму в колі не буде, а напруга між затискачами джерела стане максимальною [4,5]:

$$U_{12}\ =\ \varphi_1-\varphi_2\ =\ E.$$

Номінальним називають такий режим роботи, на який розраховують коло. У цьому режимі опір споживача має номінальне значення $R=R_н$.

Відповідно будуть номінальними струм $I_н$, напруга $U_{12н}$ та потужності джерела [4,5]

$$P_{1н}=EI_н$$

і споживача [4,5]:

$$P_{2н}=U_{12н}I_н.$$

Режим короткого замикання виникає, коли $R=0$. Це аварійний режим, що виникає внаслідок пошкодження ізоляції чи з інших причин. Струм у колі обмежується тільки внутрішнім опором джерела і за звичай перевищує в десятки разів номінальний струм [4,5]:

$$I_{кз}=E/(R_0+0)=E/R_0;\ I_{кз}>>I_н.$$

В цьому випадку напруга між затискачами джерела U_{12} та потужність споживача P_2 знижуються до нуля, але в коло надходить від джерела найбільша потужність [4,5]

$$P_1=EI_{кз},$$

що затрачується на нагрівання з'єднуючих проводів.

Погодженим режимом роботи кола називають такий режим, при якому опір споживача дорівнює внутрішньому опору джерела $R=R_0$. У цьому режимі потужність споживача дорівнює половині потужності джерела. Це означає, що половина потужності джерела перетворюється в теплову в його внутрішньому опорі.

Баланс потужностей. Суть балансу потужностей: сума потужностей, що генеруються джерелами енергії, дорівнює сумі потужностей, які споживаються приймачами енергії і потужностей втрат на внутрішніх опорах джерел.

Баланс потужностей описують рівнянням [4,5]:

$$\sum EI+\sum UJ=\sum rI^2,$$

де EI− потужності джерел напруги (якщо напрями ЕРС і струму в гілці збігаються, джерело працює як генератор, тобто віддає енергію в коло і у рівняння балансу входить зі знаком "+", а якщо напрямки ЕРС і струму в гілці протилежні, джерело споживає енергію з кола і у рівняння балансу входить із знаком "−");

UJ − потужності джерел струму (U − напруга на його затискачах);

rI^2 − потужності споживачів електричної енергії.

Баланс потужностей має вигляд [4,5]:

$$E_1I_1+E_2I_2+E_4I_4-E_5I_5+U_{35}J = r_1I_1^2+r_2I_2^2+r_3I_3^2+r_4I_4^2+r_5I_5^2,$$

де $U_{35}=- r_4I_4+E_4$.

Список питань для самоконтролю

1. Надати визначення ідеальних елементів електротехнічних пристроїв.
2. Яким чином визначаються властивості джерел електричної енергії?
3. Сформулювати закони Ома для активної та пасивної ділянки електричного кола.
4. Сформулювати 1-й та 2-й закони Кірхгофа.
5. Надати визначення роботи, потужності та закону Джоуля − Ленца.

Тема 1.2. Електричні кола постійного струму

Лекція 2. Розрахунок простих розгалужених кіл на підставі закону Ома та еквівалентного опору. Закони Кірхгофа. Закон Джоуля-Ленца. Розрахунок складних кіл за рівняннями Кірхгофа. Баланс потужності. Метод вузлових потенціалів. Аналіз електричного стану складних кіл методом накладання струмів; методом еквівалентного генератора, методами еквівалентних перетворень.

Прості та складні електричні кола. Електричні кола прийнято поділяти на прості та складні**.** Прості електричні кола мають лише одне джерело енергії і будь-яку кількість послідовно або паралельно з'єднаних споживачів енергії (елементів електричного кола), які можна звести поступовим перетворенням до одного еквівалентного. Простому колу відповідають схеми заміщення, які містять джерело електричної енергії (ДЕЕ) і еквівалентний опір кола [4,5],

$$R=R_{EK}.$$

В послідовно з'єднаних елементах кола один і той самий струм, рис. 2.1.

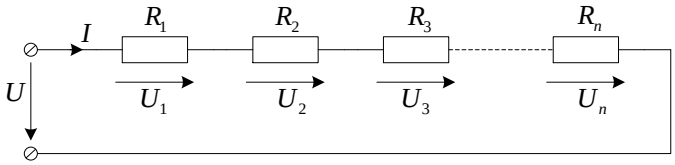


Рис. 2.1

Згідно до другого закону Кірхгофа маємо [4,5]:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + ... + U_n = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I + ... + R_n \cdot I =$$
$$= (R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n) \cdot I = R_{EK} \cdot I \,,$$

де $R_{EK} = \sum_{i=1}^{n} R_i$.

Висновок: при послідовному з'єднанні еквівалентний опір дорівнює сумі з'єднаних опорів.

Паралельне це таке з'єднання елементів кола, коли вони ввімкнені до однієї пари вузлів і, таким чином, знаходяться під однаковою напругою, рис. 2.2. Згідно до першого закону Кірхгофа маємо [4,5]:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + ... + I_n = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + ... + \frac{U}{R_n} =$$

$$= (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{U}{R_3} + ... + \frac{U}{R_n}) \cdot U = (g_1 + g_2 + g_3 + ... + g_n) \cdot U = g_{EK} \cdot U$$

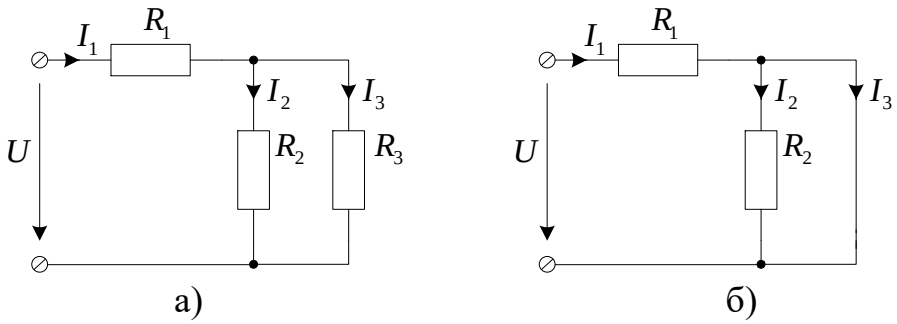
Висновок: при паралельному з'єднанні еквівалентна провідність дорівнює сумі провідностей з'єднаних опорів.

Сукупність послідовного і паралельного з'єднань елементів навивають змішаним з'єднанням.

Зауваження: коли обчислюються струми в двох паралельно з'єднаних вітках (рис. 1.3, а), зручно користуватися формулами "чужого опору", які легко виводяться за законом Ома і першим законом Кірхгофа [4,5]:

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad I_3 = I_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

Коли в одній вітці опір відсутній, наприклад у схемі рис. 2.3, б $R_3 = 0$,



а) б)

Рис. 2.3

формули "чужого опору" набувають вигляду [4,5]:

$$I_2 = I_1 \cdot 0 = 0, \quad I_3 = I_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + 0} = I_1.$$

Еквівалентні перетворення. Еквівалентні перетворення застосовують для зменшення кількості віток або вузлів у схемі, що веде до зменшення числа розрахункових рівнянь і скорочення обчислювальної роботи. Умови еквівалентних перетворень**:** напруги і струми в частинах схеми без перетворень повинні залишатися незмінними. Нижче наведено взаємне еквівалентне перетворення з'єднань споживачів енергії "трикутником" і "зіркою" (рис. 2.4).

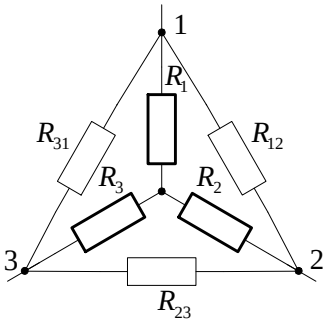


Рис. 2.4

Формули перетворення "трикутника" на "зірку" [4,5]:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}.$$

Формули перетворення "зірки" на "трикутник"[4,5] :

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}, \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}, \quad R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}$$

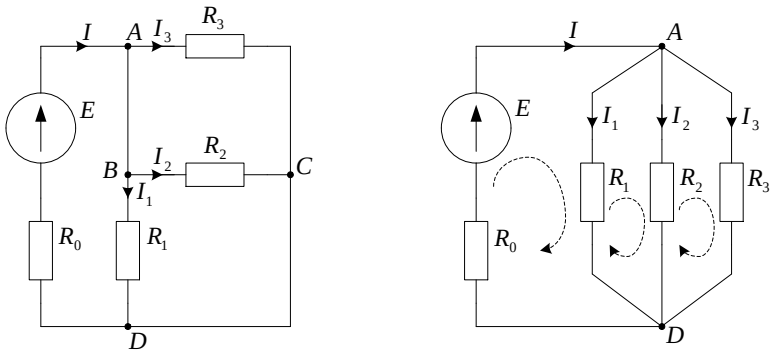
Складні електричні кола До складних електричних кіл (ЕК) належать розгалужені кола, що мають більше одного джерела енергії. Розраховують їх, використовуючи закони Кірхгофа або спеціальні методи розрахунку. Розглянемо деякі з них.

Метод рівнянь Кірхгофа. Базується на використанні законів Кірхгофа.

Переваги: придатний до розрахунку будь-якого ЕК і не потребує додаткових перетворень.

Метод рівнянь Кірхгофа є класичним і основним для розрахунку складних електричних кіл. Усі інші методи також ґрунтуються на цих фундаментальних законах електротехніки. Мета їх використання - зменшення трудомісткості розрахунків.

Рекомендується такий порядок розрахунку складних кіл за методом рівнянь Кірхгофа і, практично, усіх інших:



а) б)

Рис. 2.5

1. Вивчити схему і визначити кількість вузлів. Так, на рис. 2.5, а розгалуження утворюють тільки два вузли, бо між точками *A* і *B*, а також *D* і *C* немає опорів і вузли можна з'єднати, як це показано на рис. 2.5, б. У подібних випадках доцільно накреслити нову розрахункову схему та позначити вузли.2. Задатися довільно вибраними позитивними напрямами струмів у окремих гілках і позначити їх стрілками. Всі позначення струмів доцільно брати відповідно до номера вітки.

3. Скласти рівняння за першим законом Кірхгофа для вузлів, крім одного. Для схеми на рис. 2.5, б, яка має два вузли, рівняння за першим законом Кірхгофа буде одне:

$$I-I_1-I_2-I_3=0.$$

4. Недостаючи рівняння за кількістю невідомих струмів скласти за другим законом Кірхгофа (розбивку схеми на контури слід починати з довільного контуру, а далі стежити, щоб у кожний новий контур входила хоча б одна нова вітка, якої не було у раніш складених рівняннях, а більш зручно розбивати схему на суміжні контури-комірки).

Після вибору контурів необхідно довільно задатися напрямом їх обходу (наприклад за годинниковою стрілкою) і скласти рівняння за другим законом Кірхгофа [4,5]:

$$R_1I_1+R_0I=E$$
$$R_2I_2-R_1I_1=0$$
$$R_3I_3-R_2I_2=0$$

5. Підставити числові значення опорів при невідомих струмах і, розв`язуючи систему рівнянь, визначити струми. Коли числове значення знайденого з рівнянь струму буде негативним, то дійсний напрям струму є оберненим раніше довільно вибраному. Його потрібно показати на схемі.

Методи вузлової напруги (вузлового потенціалу), накладання та еквівалентного генератора.

Метод вузлової напруги (вузлового потенціалу) застосовується, якщо коло має тільки два вузли. Кількість віток поміж вузлами може бути довільною. Базується на першому законі Кірхгофа і законі Ома. Після прирівнювання до нульового значення потенціалу одного із вузлів, залишається невідомим потенціал другого. Обчисливши його потенціал відносно нульового, за законом Ома знаходять струми у гілках.

Переваги: значно полегшує обчислювальну роботу, оскільки немає потреби складати і розв'язувати систему рівнянь.

Порядок розрахунку. Прирівнюємо до нульового значення потенціал одного із вузлів, наприклад вузла 2, $\varphi_2=0$. Визначаємо вузлову напругу між вузлами 1 і 2 (вважаємо, що φ1>φ2) [4,5]:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1 = \frac{\sum E_i g_i}{\sum g_i}.$$

Слід пам'ятати: коли обчислюють складові в ΣEg зі знаком "+" враховують ЕРС E спрямовані до вузла 1; зі знаком "–" – від вузла 1. Струми у вітках розраховують за законом Ома.

Приклад. Визначити струми у вітках електричного кола, зображеному на рис. 2.6: $E_1 = E_2 = E_3 = 50$ *В*, $R_1 = 20$ *Ом*, $R_2 = 5$ *Ом*, $R_3 = 10$ *Ом*, $R_4 = 3$ *Ом*.

Виконання. Розраховуємо напругу між вузлами *1* і *0*, U_{10}. Нехай потенціал $\varphi_0=0$.

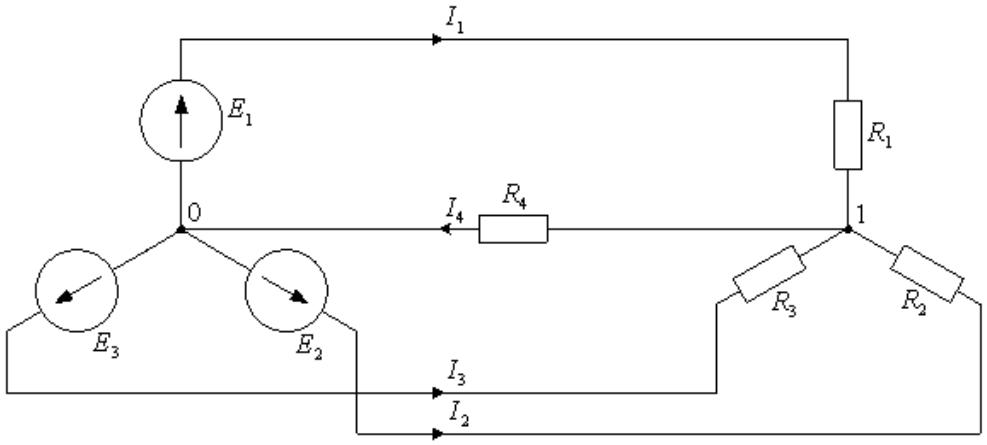


Рис. 2.6

$$U_{12} = \varphi_1 = \frac{E_1 \cdot g_1 + E_2 \cdot g_2 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4} = \frac{2.5 + 10 + 5}{0.05 + 0.2 + 0.1 + 0.33} = 25.6 \ B.$$

Знаходимо струми у вітках:

$$I_1 = \frac{\varphi_0 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = \frac{-25.6 + 50}{20} = 1.22\ A, \qquad I_2 = \frac{\varphi_0 - \varphi_1 + E_2}{R_2} = \frac{-25.6 + 50}{5} = 4.88\ A,$$

$$I_3 = \frac{\varphi_0 - \varphi_1 + E_3}{R_3} = \frac{-25.6 + 50}{10} = 2.44\ A, \qquad I_4 = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{R_4} = \frac{25.6}{3} = 8.53\ A.$$

Метод накладання. Метод ґрунтується на принципі накладання, згідно з яким струм у вітці складного кола вважають одержаним від накладання часткових струмів, що виникають у вітці від незалежної дії кожного джерела окремо. Відповідно до цього складне коло з кількома джерелами енергії розглядають як сукупність простих кіл, які містять лише одне джерело. Розрахувавши прості кола, визначають за величиною і напрямком часткові струми, спричинені дією кожного джерела окремо. Дійсний струм у будь-якій вітці складного кола від одночасної дії всіх джерел обчислюють шляхом накладання, тобто алгебраїчного складання часткових струмів, що проходять цією віткою.

Переваги: спрощуються розрахунки, оскільки складне коло перетворюється на кілька простих кіл.

Зауваження: методом накладання можна користуватися тільки для розрахунку лінійних кіл та якщо у колі не більше двох-трьох джерел енергії.

Порядок розрахунку:

1. Залишити у схемі лише одне джерело енергії, замінивши інші джерела їх внутрішніми опорами (у ідеального джерела напруги $R_0 = 0$ і його необхідно замінити відрізком провідника; у ідеального джерела струму $R_0 = \infty$ і його потрібно вимкнути).
2. Розрахувати часткові струми від дії джерела, що залишилось .
3. Обчислити часткові струми, спричинені дією інших джерел енергії.
4. Визначити дійсні струми у гілках алгебраїчним складанням часткових: довільно вибрати додатний напрямок струму у вітці, що розглядається, а часткові струми, напрямок якого збігається з умовно-додатним, слід враховувати зі знаком "+"; напрямок яких не збігається − зі знаком "–".

Метод еквівалентного генератора. Метод використовується, коли потрібно обчислити струм тільки в одній вітці і базується на теоремі про еквівалентний генератор або активний двополюсник. Під активним двополюсником розуміють частину кола, що містить джерела енергії і з'єднується з іншими елементами кола двома затискачами (рис. 2.7).

Згідно з теоремою, струм у гілці, що ввімкнена на затискачі 1-2, залишається незмінним, якщо активний двополюсник замінити еквівалентним генератором з електрорушійною силою (ЕРС) E_{ekb} і його внутрішнім опором R_{ekb}.

Значення ЕРС E_{ekb} обчислюється як напруга U_{12} на затискачах 1-2 при вимкненій досліджуваній гілці (режим холостого хода), $E_{ekb}= U_{12}$.

Величина внутрішнього опору R_{ekb} розраховується як еквівалентний опір двополюсника відносно затискачів 1-2 у тому ж режимі холостого ходу.

Після такої заміни складне коло можна зобразити одно контурною схемою, струм в якій легко визначити за законом Ома.

Порядок розрахунку:

1. Вимкнути із схеми гілку, в якій потрібно обчислити струм, і позначити затискачі будь-якими індексами, наприклад 1 і 2.

2. Визначити напругу U_{12}, користуючись найбільш раціональним у даному випадку методом розрахунку складних кіл.

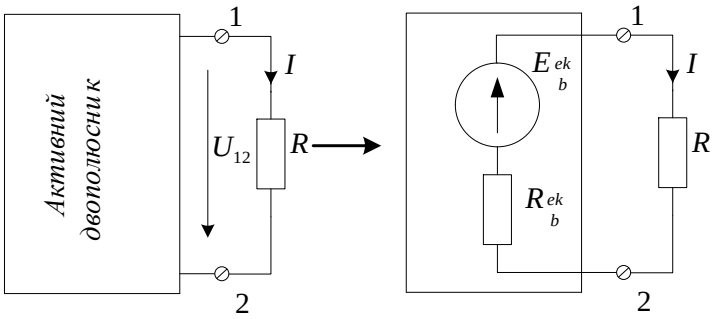


Рис. 2.7

3. Визначити еквівалентний опір кола R_{ekb} між затискачами 1 і 2 , замінивши джерела енергії їх внутрішніми опорами (ідеальне джерело напруги замінити відрізком провідника з нульовим опором, ідеальне джерело струму вимкнути).

Еквівалентний опір кола R_{ekb} можна визначити за режимами холостого ходу та короткого замикання: вимірюється величина струму, що протікає через клеми двополюсника при їх короткому замиканні, $I_{кз}$. Тоді еквівалентний опір R_{ekb} між затискачами 1 і 2 буде: $R_{ekb} = U_{12}/ I_{кз}$.

4. Скласти схему еквівалентного генератора та обчислити струм у гілці за законом Ома:

Зауваження: на загал гілка, в котрій потрібно обчислити струм, може включати також джерело напруги або з'єднувати довільну частину електричного кола.

Список питань для самоконтролю

1. В чому полягає різниця між простими та складними електричними колами?
2. На яких законах базується метод рівнянь Кірхгофа?
3. В якому випадку застосовується метод вузлової напруги?
4. На якому принципі грунтується метод накладання?
5. В якому випадку застосовується метод еквівалентного генератора?

Тема 1.3. Електричні кола однофазного синусоїдного струму

Лекція 3. Причини широкого розповсюдження електричних пристроїв синусоїдного струму промислової частоти. Основні параметри, що характеризують синусоїдну функцію. Способи зображення функції. Ідеальний резистор у колі синусоїдного струму. Ідеальна котушка у колі синусоїдного струму. Ідеальний конденсатор у колі синусоїдного струму.

Електричні кола змінного струму. Відмінність розрахунку електричних кіл змінного струму від кіл постійного струму полягає в тому, що математичний апарат для їх досліджень більш громіздкий, адже у відповідних рівняннях, що відповідають математичним моделям електричних кіл, присутні напруги та струми, що змінюються у часі.

Відомо, що найбільш економічною формою змінного струму при виробництві, передачі, розподіленню та використанню електричної енергії є найпростіша форма змінного струму − синусоїдальна.

Електричні кола синусоїдального струму. Для спрощення задач розрахунку електричних кіл синусоїдального струму в електротехніці використовуються графічні методи. На рис. 3.1 продемонстровані два способи зображення синусоїдальної напруги. На рис. 3.1, б синусоїдальна напруга $u(t)=U_m sin(wt+\Psi u)$ зображена за допомогою графіка з початковою фазою ψ_u, амплітудою U_m та кутовою частотою $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$, де T – період. Значення напруги для заданого моменту часу t називають миттєвим.

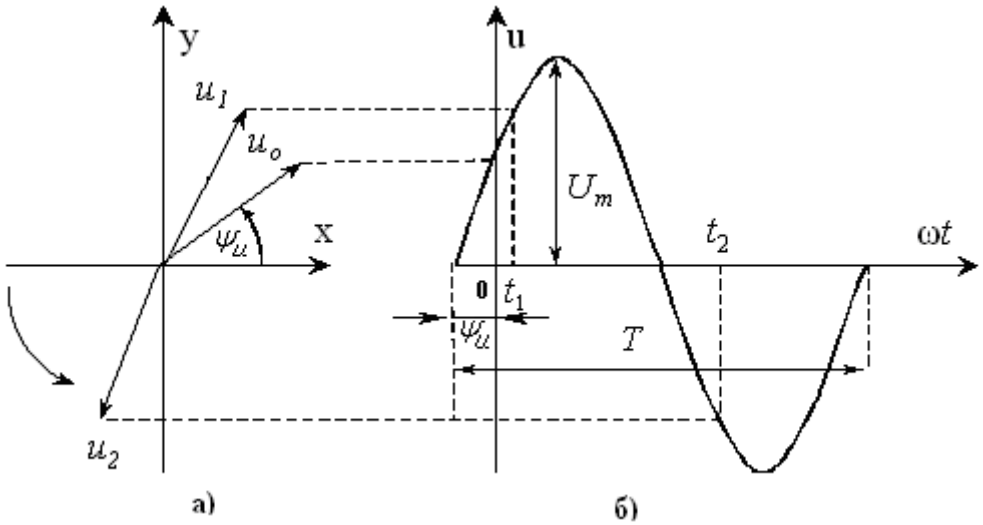


Рис. 3.1

На рис. 3.1, а синусоїдальну напругу подано у вигляді радіус-вектору U_m, який обертається відносно початку координат з кутовою частотою ω проти годинникової стрілки. В момент часу $t = 0$ його положення визначається початковим фазовим кутом ψ_u, а в моменти часу t_1, t_2 – відповідно, кутами $(\omega t_1 + \psi_u)$ та $(\omega t_2 + \psi_u)$.

Відповідно до визначення тригонометричної функції синуса, проекція радіус-вектору на вісь ***y*** визначається функцією синусу [4,5]:

$$u(t)=U_m \sin(\omega t+\psi_u).$$

Тобто, будь-якому радіус-вектору, який рівномірно обертається, однозначно відповідає синусоїдна функція. Коли використовується комплексна форма зображень, координатні осі *x* та *y* замінюються відповідно на осі комплексної площини: дійсну −*Re (Real)* та уявну −*Im(Imaging).* При цьому, як відомо, будь-якому вектору $\underline{A}$, що розміщується на комплексній площині, однозначно відповідає комплексне число, яке може бути записане в алгебраїчній, тригонометричній та показовій (експоненціальній) формах.

Алгебраїчна форма: $\dot{A} = a_1 + ja_2$. Тригонометрична: $\dot{A} = a\cos\alpha + ja\sin\alpha$.

Експоненціальна: $\dot{A} = ae^{j\alpha}$. Перехід від однієї форми зображень до іншої забезпечується наступними формулами [4,5]:

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}; \qquad \alpha = arctg(\frac{a_2}{a_1});$$

$$a_1 = a\cos\alpha; \qquad a_2 = a\sin\alpha;$$

$$a_1 = \mathrm{Re}(\dot{A}); \qquad a_2 = \mathrm{Im}(\dot{A}).$$

Якщо $A=1$, то справедливі співвідношення:

$$e^{j0} = \cos 0 + j\sin 0 = 1; \qquad e^{j\pi} = \cos\pi + j\sin\pi = -1;$$

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos\frac{\pi}{2} + j\sin\frac{\pi}{2} = j; \qquad e^{j\left(-\frac{\pi}{2}\right)} = \cos\frac{\pi}{2} - j\sin\frac{\pi}{2} = -j.$$

Комплексна форма зображень синусоїдальних напруг та струмів породжує комплексний (символічний) метод розрахунку електричних кіл синусоїдального струму, який значно спрощує їх розрахунки.

Відношення комплексної амплітуди напруги ділянки електричного кола до амплітуди струму цієї ділянки називається її комплексним опором [4,5]:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{U_m e^{j\psi_u}}{I_m e^{j\psi_i}} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z\, e^{j\varphi},$$

де Z – модуль комплексного опору, а $\varphi = \psi_u - \psi_i$ – його аргумент.

Параметри комплексного опору можуть визначатись і діючими значеннями комплексних напруг і струмів, оскільки у практиці використання змінних струмів широко використовується поняття їх діючих значень, які визначаються як середньоквадратичне їх значення за період. Наприклад, діюче значення змінного струму визначається за виразом

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

а для синусоїдальної форми струму маємо [4,5]:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot I_m\ .$$

Такі ж співвідношення справедливі і для синусоїдальних напруги та ЕРС.

Закони Ома і Кірхгофа в колах змінного струму. Закон Ома і закони Кірхгофа для миттєвих значень напруг і струмів формулюються однаково і незалежно від того, чи є кола лінійні чи нелінійні, змінюються чи не змінюються в них напруги та струми в часі.

Так, відповідно до першого закону Кірхгофа, алгебраїчна сума миттєвих значень струмів в вузлі електричного кола дорівнює нулю **[4,5]**:

$$\sum i_k = 0\ .$$

У комплексній формі рівняння першого закону Кірхгофа для електричних кіл синусоїдального струму має вигляд **[4,5]**:

$$\sum \dot{I}_k = 0\ .$$

Рівняння другого закону Кірхгофа формулюється так: алгебраїчна сума миттєвих значень напруг , які діють на всіх ділянках у будь-якому контурі електричного кола, дорівнює нулю, тобто **[4,5]**:

$$\sum u_k = 0\ ,$$

а його комплексна форма в колах синусоїдального струму має вигляд **[4,5]**:

$$\sum \dot{U}_k = 0\ .$$

З урахуванням закону Ома, другий закон Кірхгофа може бути сформульований так: алгебраїчна (комплексна) сума спаду напруг на активних і реактивних елементах будь-якого контуру дорівнює алгебраїчній (комплексній) сумі ЕРС, які діють в цьому контурі. Правила запису рівнянь залишаються такими, як і для електричних кіл постійного струму.

Активний опір у колі синусоїдального струму. В електричному колі з активним опором при дії синусоїдальної напруги, рис. 3.2

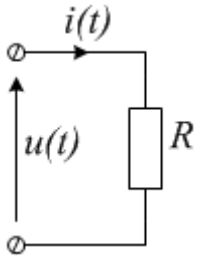


Рис. 3.2

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

у відповідності до закону Ома маємо [4,5]:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

форма зображень напруги і струму електричного кола (в подальшому векторна діаграма) на комплексній площині зображена на рис. 3.3.

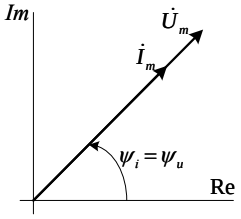


Рис. 3.3

Вектор напруги $\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}$ має початковий кут ψ_u. Вектор струму $I_m = I_m e^{j\psi_i}$ співпадає за фазою з вектором напруги, тобто $\psi_i = \psi_u = \psi$, а кут зсуву фаз між напругою та струмом $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

Миттєва потужність в електричному колі [4,5]

$$P(t) = u(t)i(t) = UI - UI\cos(2\omega t + 2\Psi)$$

має постійну складову і змінну, що змінюється з подвійною частотою.

Середнє значення потужності за період [4,5]

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)\,dt = \frac{UI}{T}\int_0^T \sin^2(\omega t + \psi)\,dt = UI$$

називають активною потужністю.

Її також можна визначити за виразом [4,5]:

$$P=I^2R=U2g,$$

де $g=1/R$ – провідність.

Одиницею виміру активної потужності є *ват [Вт*], а енергії за інтервал часу *t– ват-секунда [Вт·с], W = Pt*.

Індуктивність у колі синусоїдального струму. Якщо в електричному колі з ідеальним індуктивним елементом *L* (рис. 3.4)

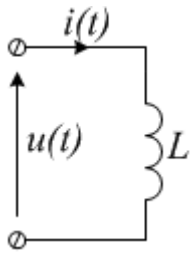


Рис. 3.4

діє струм $i(t)=I_m\sin\omega t$, то потокозчеплення самоіндукції ψ також матиме синусоїдальну форму [4,5]:

$$\psi(t) = L\,i(t) = L\,I_m \sin\omega t\,.$$

Зміна потокозчеплення веде до виникнення у котушці ЕРС самоіндукції:

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L\frac{di}{dt} = -L\omega I_m \cos\omega t = E_{mL}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

яка відстає від струму за фазою на π/2.

Дія ЕРС завжди спрямована проти дії напруги u_L, тобто[4,5] :

$$u_L = -e_L = \frac{d\psi}{dt} = L\frac{di}{dt} = L\omega I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Напруга на індуктивності випереджає струм за фазою на кут π/2, що пояснюється векторною діаграмою, зображеною на рис. 3.5.

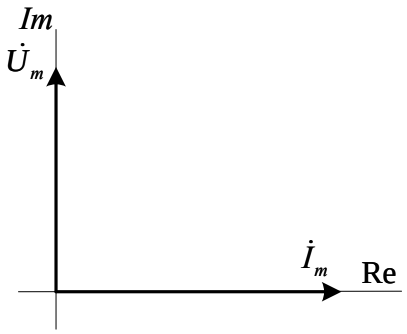


Рис. 3.5

З виразу очевидний зв'язок між амплітудними значеннями напруги і струму [4,5]:

$$U_m = \omega L I_m = X_L I_m.$$

Величина $X_L = \omega L$ називається **індуктивним опором**.

Комплексна форма запису струмів і напруг встановлює наступні залежності:

для струму

$$\dot{I}_m = I\, e^{j0};$$

для напруги, відповідно, для амплітудних і діючих значень [4,5]:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\frac{\pi}{2}} = X_L I_m e^{j\frac{\pi}{2}} = j X_L I_m e^{j0} = j X_L \dot{I}_m,\ \dot{U} = j X_L \dot{I}.$$

Таким чином комплексний опір індуктивності $\underline{Z}=jX_L$ є уявне число з модулем X_L.

Миттєве значення потужності в індуктивності

$$p(t) = u(t)\, i(t) = U_m \sin \omega t\ I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = UI \sin 2\omega t$$

є періодична функція, що змінюється з подвійною частотою. Між джерелом живлення та індуктивністю має місце обмін енергією з подвійною частотою Активна потужність за період дорівнює

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T U\, I \sin 2\omega t\, dt = 0,$$

що говорить про те, що у колі з індуктивністю робота не виконується.

У той же час, інтенсивність обміну енергією між джерелом і магнітним полем індуктивності характеризується амплітудним значенням миттєвої потужності, яка називається реактивною потужністю [4,5]:

$$Q_L=UI=X_LI^2.$$

Розмірність реактивної потужності – вольт-ампер реактивний [вар].

Конденсатор у колі синусоїдального струму. Коли до джерела змінної напруги $u(t)=U_m\sin\omega t$ приєднаний конденсатор (рис. 3.6),

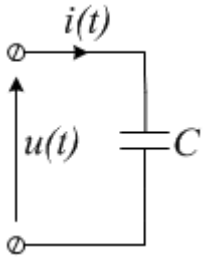


Рис. 3.6

то зміна напруги $u(t)$, що прикладається до його обкладинок, приводить до перерозподілу заряду $q(t)=Cu(t)$ і, як результат, у колі з'являється струм [4,5]:

$$i(t)=\frac{dq}{dt}=C\frac{du}{dt}=I_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right),$$

де $I_m=\omega CU_m$.

Струм у колі випереджає напругу на π/2. Величина $X_c=1/\omega C$ називається ємнісним опором, а закон Ома для кола з ємністю записується у вигляді:

$$U_m=X_C\,I_m \qquad \text{або} \qquad U=X_C\,I\ .$$

Комплексна форма запису закону Ома може бути визначена, якщо виходити з того, що

$$\dot{U}_m=U_m e^{j0}\ ;\dot{I}_m=I_m e^{j\frac{\pi}{2}};\underline{Z}=\frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m}=\frac{U_m e^{j0}}{I_m e^{j\frac{\pi}{2}}}=X_C e^{-j\frac{\pi}{2}}=-j\,X_C.$$

Таким чином, маємо:

$$\dot{U}_m=-jX_c\dot{I}_m \text{ або } \dot{U}=-jX_c\dot{I}.$$

Векторна діаграма (рис. 3.7) відображає фазові співвідношення між струмом через конденсатор і напругою на його обкладинках.

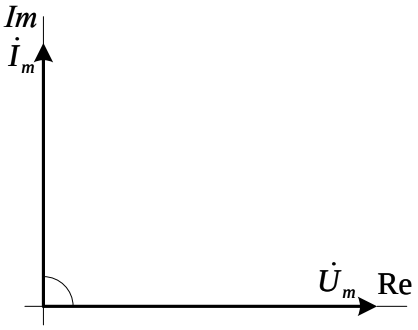


Рис. 3.7

Комплексний опір конденсатора є від'ємним уявним числом з модулем

$$X_c = 1/\omega C.$$

Миттєва потужність у колі [4,5]:

$$p(t) = u(t)\, i(t) = UI \sin 2\omega t,$$

тобто має місце обмін енергією між джерелом живлення та конденсатором.

Інтенсивність обміну енергією між ними характеризується амплітудним значенням миттєвої потужності, яка називається реактивною потужністю

$$Q_c = UI = XcI^2.$$

Реактивна потужність вимірюється у вольт-амперах реактивних.

Середня, або активна потужність в колі

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)\, dt = \frac{1}{T}\int_0^T U\, I \sin 2\omega t\, dt = 0$$

Лекція 4. Рівняння електричного стану кола з послідовним з'єднанням резистора, індуктивної котушки та конденсатора. Векторна діаграма кола. Трикутник напруг. Трикутник опорів. Резонанс напруг. Практичне застосування резонансу напруг. Рівняння електричного стану кола з паралельним з'єднанням резистора, індуктивної котушки та конденсатора. Векторна діаграма. Трикутник струмів. Трикутник провідностей. Резонанс струмів. Частотні та резонансні характеристики. Практичне застосування резонансу струмів. Розрахунок кіл синусоїдного струму методом комплексних чисел.

Коло з послідовним зєднанням *R, L* і *C* елементів.

Нехай електричне коло, що на рис. 4.1, живиться від ідеального джерела напруги синусоїдального струму [4,5]:

$$u(t)=U_m\sin(\omega t+\psi_i)$$

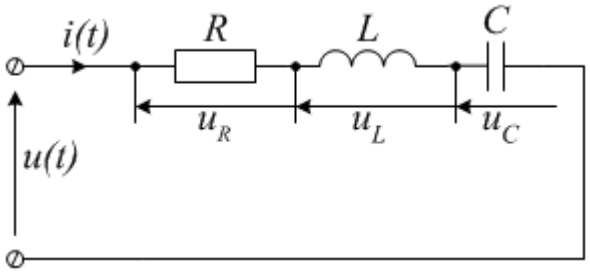


Рис. 4.1

У відповідності до другого закону Кірхгофа, для миттєвих значень напруг, маємо:

$$u = u_R + u_L + u_C .$$

Враховуючи лінійність елементів схеми струм в колі, напруги на елементах кола u_R, u_L і u_C також змінюватимуться за синусоїдальним законом. Це дає можливість використати комплексну форму запису рівняння відповідно до другого закону Кірхгофа, тобто:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

Враховуючи, що струм кожного з елементів один і той же, можемо записати:

$$\dot{U}_R = \dot{I}\,R\,;\ \ \dot{U}_L = j\omega L\,\dot{I}\,;\ \ \dot{U}_C = -\frac{1}{j\omega C}\dot{I}\,,\ \text{або}$$

$$\dot{U}_R = \dot{I}\,R\,;\ \ \dot{U}_L = j\,X_L\,\dot{I}\ ;\ \ \dot{U}_C = -j\,X_C\,\dot{I}\ .$$

Це дає можливість рівняння кола записати у вигляді [4,5]:

$$\dot{U} = \dot{I}\,(R + j\,X_L - j\,X_C) = \dot{I}\,\underline{Z}\,.$$

Величина $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ є еквівалентним комплексним опором кола і визначається як алгебраїчна сума комплексних опорів, що утворюють коло. Уявна складова $X_L - X_C = X$ називається реактивним опором, який в залежності від величини X_L і X_C може носити і коло в цілому індуктивний $(X_L > X_C)$, ємнісний $(X_C > X_L)$ і активний характер (опір в цьому випадку має нульове значення $(X_L = X_C)$).

На комплексній площині комплексний опір можна подати як вектор, що замикає геометричну суму його складових, рис. 4.2).

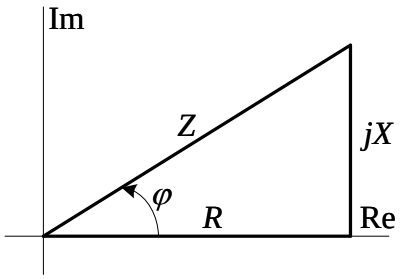


Рис. 4.2

Побудований таким чином трикутник називається трикутником опорів.

З трикутника опорів витікають наступні співвідношення [4,5]:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}\ ;\ R = Z\cos\varphi\ ;\ X = Z\sin\varphi\ ;\ \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{X}{R}\right).$$

Модуль комплексного опору *Z* називають повним опором кола, а аргумент комплексного опору φ кутом зсуву між напругою джерела та струмом і він дорівнює різниці початкових фаз напруги і струму, тобто $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

На рис. 4.3 подані векторні діаграми напруг за початковою фазою струму $\psi_i = 0$ для трьох випадків: $X_L > X_C$ ($\varphi > 0$, рис. 4.3, а); $X_L < X_C$ ($\varphi < 0$, рис. 4.3, б); $X_L = X_C$ ($\varphi = 0$, рис. 4.3, в). На векторних діаграмах $\dot{U}_p = \dot{I}\ j(X_L - X_C)$ називається реактивною складовою напруги, а $U_a = U_R = IR$ її **активною складовою (АС)**.

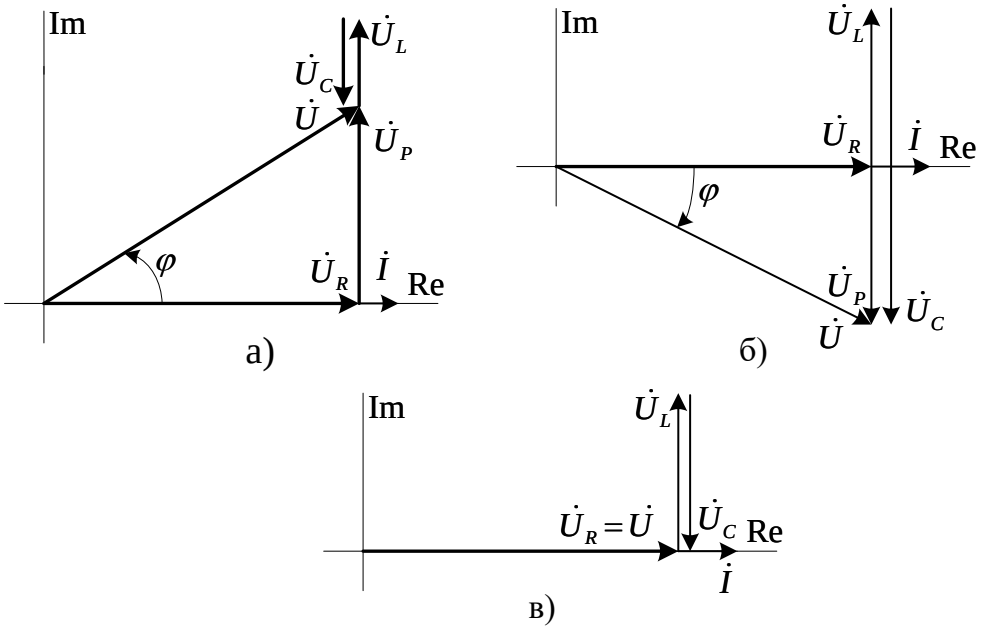


Рис. 4.3

Векторна сума цих складових є напруга джерела, а з утвореного трикутника напруг цих складових, випливають наступні співвідношення **[4,5]**:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}\,;\ \ \varphi = arctg\frac{U_p}{U_a}\,;\ \ U_a = U\cos\varphi\,;\ U_p = U\sin\varphi\,.$$

За умови $X_L = X_C$ маємо особливий режим, коли спади напруг на індуктивності і ємності дорівнюють один одному і взаємно компенсуються. Такий режим називається **резонансом напруг**. В цьому випадку, незважаючи на наявність у колі реактивних елементів, від джерела не споживається реактивний струм. В випадку коли $R << X_L = X_C$ напруги на індуктивностях і ємностях будуть значно більшими за напругу джерела. Через це в енергетичних установках не застосовують послідовного з'єднання ємностей з індуктивностями з метою збільшення коефіцієнта потужності (про коефіцієнт потужності мова йтиме нижче), оскільки зміна величини ємності або індуктивності з експлуатаційних причин може привести до виникнення резонансу напруг.

Приклад. Електричне коло з послідовним з'єднанням пасивних елементів $R = 3$ *Ом*, $L = 0.019$ *Гн* і $C = 1590$ *мкФ* приєднано до джерела напруги $u(t) = 310{,}2 \sin\omega t$ *В* промислової частоти, рис. 4.1.

Відповідно до вихідних даних за допомогою розрахунків виконати наступне:

1. Визначити діючі значення струму та падіння напруг на елементах кола.

2. Записати вирази для миттєвих значень струму в колі і напруг на його елементах.

3. Дослідити залежності активного, індуктивного, ємнісного та повного опорів кола від частоти $R = \Psi(f)$, $X_L = \Psi(f)$, $X_C = \Psi(f)$ *та* $Z = \Psi(f)$.

4. Дослідити залежності струму та напруг на елементах кола від частоти джерела.

Виконання. 1. Визначаємо індуктивний X_L і ємнісний X_C опори та записуємо значення повного опору кола в комплексній формі $\underline{Z}$:

$X_L = \omega L = 2\pi f = 2\ 3.14\ 0.019 = 6$ *Ом;*

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 1590 \cdot 10^{-6}} = 2 \text{ Ом;}$$

$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = 3 + j(6-2) = 3 + j4 = 5\,\ell^{j53^\circ}$ *Ом.*

Визначаємо комплекси діючих значень струму та падіння напруг на елементах електричного кола:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}},$$

де $\dot{U}$ комплекс діючої напруги джерела $\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}\ell^{j0^\circ} = \frac{310.2}{\sqrt{2}} = 220$ *В*

$$\dot{I} = \frac{220}{5\ell^{j53^\circ}} = 44\ell^{-j53^\circ}\ A,\ \ \dot{U}_R = R \cdot \dot{I} = 3 \cdot 44\ell^{-j53^\circ} = 132\ell^{-j53^\circ}\ B,\ \dot{U}_L = jX_L \cdot \underline{I} = 6\,\ell^{j90^\circ} \cdot$$

$$44\ell^{-j53^\circ} = 264\ell^{j37^\circ}\ B,\ \dot{U}_C = -jX_C \cdot \underline{I} = 2\ell^{-j90^\circ} \cdot 44\ell^{-j53^\circ} = 88\ell^{-j143^\circ}\ B.$$

2. Вирази для миттєвих значень струму в колі і напруг на його елементах:

$$i = 44\sqrt{2}\sin(314t - 53^\circ)\ A,$$

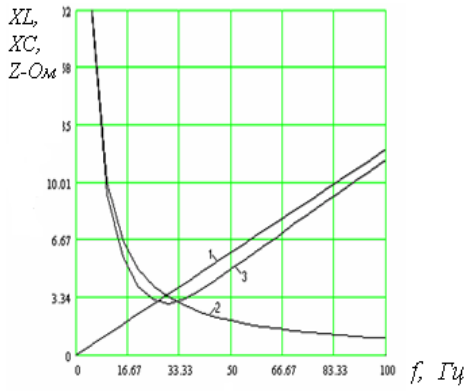
$$u_R = 132\sqrt{2}\ \sin(314t - 53^\circ)\ B,$$

$$u_L = 264\sqrt{2}\ (\sin 314t + 37^\circ),$$

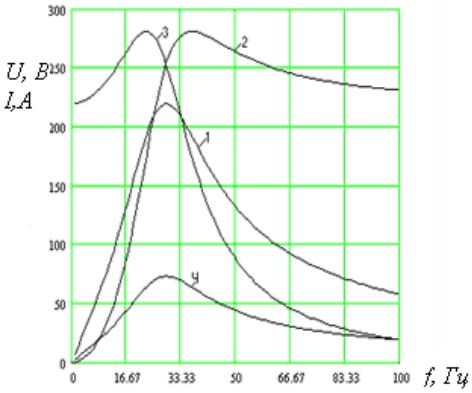
$$u_C = 88\sqrt{2}\ \sin(314t - 143^\circ)$$

3. Залежності індуктивного (крива −1), ємнісного (крива −2) та повного опорів (крива −3) від частоти досліджені і побудовані в середовищі *Mathcad*, в частотному діапазоні 1÷100 Гц, рис. 4.4, а.

В тому ж частотному діапазоні подані залежності від частоти напруг на активному − крива 1, індуктивному − крива 2 і ємнісному опорах − крива 3 та струму в колі − крива 4, рис. 4.4, б.



4.4, а



4.4,б

Коло з паралельним зєднанням *R, L* і *C* елементів.

Для електричного кола, схема якого наведена на рис. 4.5,

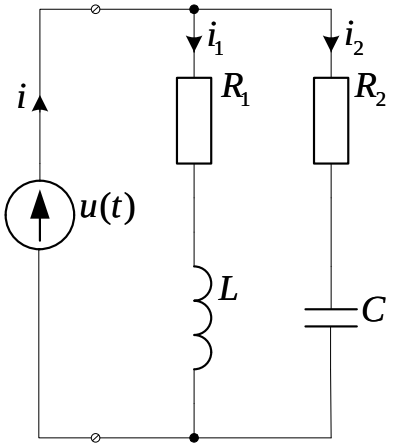


Рис. 4.5

з джерелом напруги

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

рівняння першого закону Кірхгофа в комплексній формі має вигляд [4,5]:

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

де

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} = \frac{\dot{U}}{R_1 + jX_L},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{\dot{U}}{R_2 - jX_C}.$$

Тоді

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{U}(\underline{Z}^{-1} + \underline{Z}^{-1}).$$

Наведені вище рівняння набудуть вигляду:

$$\dot{I}_1 = \dot{U} \cdot \underline{Y}_1; \quad \dot{I}_2 = \dot{U} \cdot \underline{Y}_2; \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{U} \cdot (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2) = \dot{U} \cdot \underline{Y}.$$

Введений параметр електричного кола $\underline{Y}$ називають **комплексною провідністю** $\underline{Y} = \underline{Z}^{-1}$. Він має активну g і реактивну b складові, тобто

$$Y = g + jb.$$

Уявна складова $b=b_L-b_C$ називається **реактивною провідністю**, яка в залежності від величини b_L і b_C може носити індуктивний ($b_L>b_C$), ємнісний ($b_L<b_C$) характер або мати нульове значення ($b_L=b_C$).

На комплексній площині комплексну провідність можна подати як вектор, що замикає геометричну суму його складових (рис. 4.6), а побудований таким чином трикутник, називається трикутником провідностей.

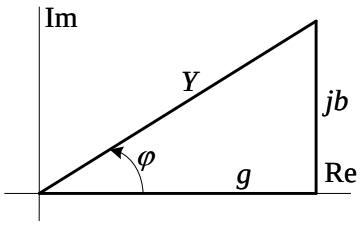


Рис. 4.6

З трикутника провідностей витікають наступні співвідношення **[4,5]**:

$$Y=\sqrt{g^2+b^2};\ \ \varphi=arctg\frac{b}{g};\ g=Y\cos\varphi;\ b=Y\sin\varphi\,.$$

Дуже важливо мати на увазі, що взаємно оберненими величинами є тільки повний опір і повна провідність **[4,5]**:

$$Z=\frac{1}{Y},\ Y=\frac{1}{Z}\,.$$

Активні провідності бувають оберненими активним опорам тільки в окремих випадках, коли вся гілка має тільки активні опори. Реактивні провідності можуть бути оберненими реактивним опорам тоді, коли в колі є тільки реактивні опори одного виду (X_L або X_C).

Після визначення комплексних значень струмів $\dot{I}_1$ та $\dot{I}_2$, зобразимо їх у комплексній площині відносно напруги $\dot{U}=U\cdot\ell^{j\frac{\pi}{2}}$, рис. 4.7, а. Струм $\dot{I}_1$ відстає від напруги на кут $\varphi_1=arctg\ X_L/R_1$, а струм $\dot{I}_2$ випереджає напругу на кут $\varphi_2=arctg\ X_C/R_2$. Відповідно, струм $\dot{I}$ нерозгалуженої частини визначатиметься як геометрична сума:

$$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2\,.$$

Кожен із струмів, враховуючи наявність активних опорів, має активну складову *(Ia1, Ia2)*, що збігається з напрямком вектора напруги та реактивну *(* $\dot{I}_{p1}$, $\dot{I}_{p2}$) яка, відповідно до характеру реактивності, випереджає вектор напруги на $\frac{\pi}{2}$ (складова $\dot{I}_{p2}$) або відстає на такий самий кут ($\dot{I}_{p1}$), а їх алгебраїчні суми є активною (I_a) та реактивною (I_p) складовими вектору струму в нерозгалуженій частині кола (I). З утвореного таким чином трикутника струмів витікають наступні співвідношення **[4,5]**:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}\ ;\ \varphi = arctg\frac{I_p}{Ia};\ I_a = I\cos\varphi\ ;\ I_p = I\sin\varphi\ .$$

На рис. 4.7, б зображена векторна діаграма за умови, що $b_L = b_C$.

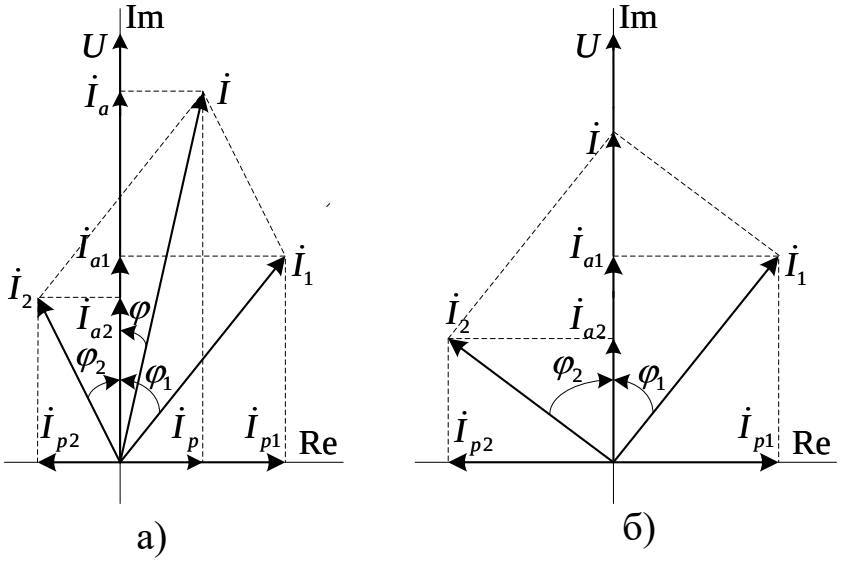


Рис. 4.7

В гілках з індуктивністю і ємністю струми дорівнюють один одному і зворотні за фазою, тому компенсуються. В колі має місце режим, який називається **резонансом струмів.** В нерозгалуженій частині кола реактивні струми відсутні і цю властивість використовують для поліпшення коефіцієнту потужності $\cos\varphi$ електричних установок з допомогою паралельного приєднання ємностей до індуктивних споживачів.

Потужність в колах синусоїдального струму. В лекції №2 були розглянуті питання потужностей для ідеальних пасивних двополюсників, що носять, відповідно, тільки активний, тільки індуктивний і тільки ємнісний характер.

Розглянемо більш загальний випадок. Нехай електричне коло з послідовним з'єднанням *R,L* і *C* елементів має активно - індуктивний характер, тобто

$$X_L > X_C .$$

Напруга і струм в такому випадку зсунені за фазою на кут φ [4,5]:

$$u = U_m \sin \omega t, \quad i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Зображення потужності в комплексній формі буде мати вигляд:

$$\tilde{S} = \dot{U}\dot{I}^* = Ue^{j\psi_u} \cdot Ie^{-j\psi_i} = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} = UIe^{j\varphi},$$

де $\dot{I}^*$ – струм, комплексно спряжений струму $\dot{I}$ (якщо $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$, то комплексно сполучений струм $\dot{I}^* = Ie^{-j\psi_i}$).

Таким чином комплексна потужність в тригонометричній та алгебраїчній формах буде [4,5]:

$$\tilde{S} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = P + jQ.$$

Дійсну складову комплексної потужності $Re[\tilde{S}] = P = UI\cos\varphi$ називають **активною** потужністю, а уявну складову $Im[\tilde{S}] = Q = UI\sin\varphi$ **реактивною потужністю (РП)**.

Відзначимо, що середнє значення миттєвої потужності

$$p = ui = U_m \sin\omega t I_m \sin(\omega t - \varphi) = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t - \varphi)$$

$$P_{CP} = \frac{1}{T}\int_0^T u \cdot i dt = \frac{1}{T}\int_0^T p dt = UI\cos\varphi$$

співпадає зі значенням активної потужності.

Електротехнічні пристрої розробляють для роботи за визначеними напругами та струмом. Тому їх характеризують не активною потужністю, що залежить від кута зсуву фаз φ між напругою і струмом, а повною потужністю

$$S = UI.$$

Розмірності потужностей: повної – вольт-ампер (В⋅А), активної - Ват (Вт), реактивної – вольт-ампер реактивний (*Вар*).

Відношення активної потужності до повної, що дорівнює косинусу кута зсуву фаз між напругою і струмом, називається коефіцієнтом потужності [4,5]:

$$\frac{P}{S} = \frac{UI\cos\varphi}{UI} = \cos\varphi .$$

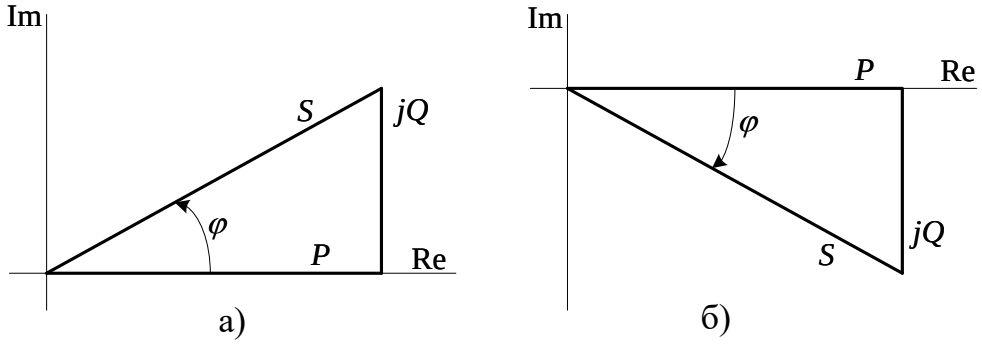
Для кращого використання електротехнічної енергії бажано мати споживачі з більш високим коефіцієнтом потужності. Високий коефіцієнт потужності бажаний також для зменшення втрат в лініях електропередач. За даною активною потужністю споживача струм у лінії тим менше, чим більше значення cos φ:

$$I=P/U\ cos\varphi.$$

Активна, РП та повна потужності мають наступні взаємозв'язки [4,5]:

$$P = S\cos\varphi;\quad Q = S\sin\varphi;\quad S = P \pm jQ;\quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}\ .$$

Для потужностей, як і для опорів та напруг, можна побудувати трикутники потужностей (рис. 4.8, а − для споживача з активно − індуктивним характером навантаження і рис. 4.8, б – для споживача з активно – ємнісним характером навантаження).



а) б)

Рис. 4.8

Баланс потужностей. Баланс потужностей у колах синусоїдального струму, як і у колах постійного струму, витікає із закону збереження енергії: алгебраїчна сума комплексних потужностей всіх джерел дорівнює алгебраїчній сумі комплексних потужностей всіх споживачів, що рівнозначно виконанню балансу активних і реактивних потужностей [4,5]:

$$\sum P_{ДЖ} = \sum P_{СП}\ ;\quad \sum Q_{ДЖ} = \sum Q_{СП}\ ,$$

де $P_{дж}$, $Q_{дж}$, $P_{СП}$, $Q_{СП}$ – відповідно активні і реактивні потужності джерел і споживачів.

При наявності в схемі індуктивних і ємнісних елементів суму реактивних потужностей споживачів слід обчислювати алгебраїчно: споживана потужність індуктивними елементами вважається позитивною, а ємнісними – негативною.

Розгалужені електричні кола. Розрахунок розгалужених електричних кіл синусоїдального струму з одним джерелом ЕРС виконується комплексним методом подібно до розрахунку кіл постійного струму. Приведемо приклад розрахунку такого електричного кола.

Приклад. Споживачі з активним ($R_1=5$ *Ом)* та активно-індуктивним

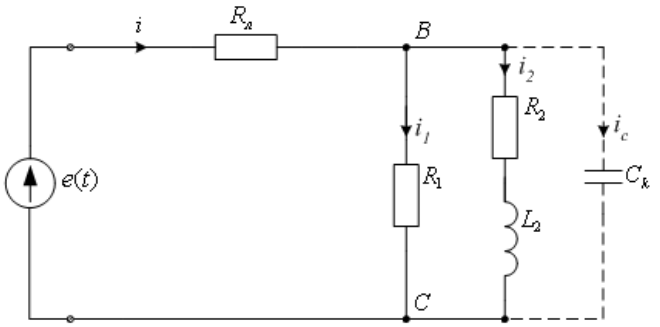


Рис. 4.9

характером навантаження ($R_2=3$ *Ом,* $L_2=0.02$ *Гн)* і напругою на їх затискачах (U_{BC} *=220 В)* з'єднані лінією електропередач ($R_л=1.5$ *Ом)* з ідеальним джерелом ЕРС *e(t)* промислової частоти, рис. 4.9.

Виконати наступне:

1. Визначити діючі значення струмів в гілках кола, спад нап

2. Визначити діючі значення струмів в гілках кола, спад напруги в лінії, ЕРС джерела, потужність і коефіцієнт потужності споживачів.

3. Визначити значення компенсаційної ємності $C_к$, приєднання якої паралельно до споживачів забезпечить активно-ємнісний характер навантаження з коефіцієнтом потужності, $\cos\varphi_К = 0.995$. Виконати дії відповідно до п. 1 для цього випадку.

4. Побудувати сумісні топографічні векторні діаграми напруг і векторні діаграми струмів для обох випадків.

Виконання.

1. Всі обчислення відповідно до завдання виконаємо в середовищі *Mathcad,* а простота запису математичних виразів в середовищі *Mathcad* та використаних ідентифікаторів параметрів і змінних кола не потребує додаткових пояснень.

Подання комплексно-сполучених чисел виконується за допомогою символу подвійна кавичка (").

Визначення значення компенсаційної ємності $C_к$ виконаємо з таких міркувань.

Еквівалентну схему заміщення ділянки електричного кола зі споживачами після приєднання компенсуючої ємності можна подати у вигляді рис. 4.10, а, векторна діаграма якої показана на рис. 4.10, б.

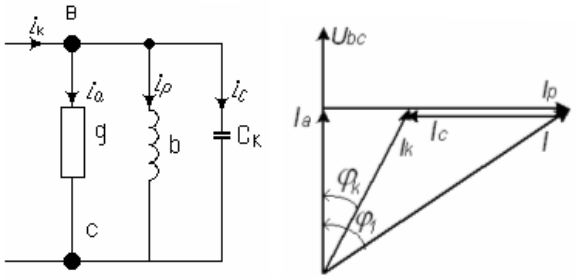


Рис. 4.10

$i := \sqrt{-1}$

$f := 50 \cdot Hz$ $RL := 1.5 \cdot \Omega$ $R1 := 5 \cdot \Omega$ $R2 := 3 \cdot \Omega$ $L2 := 0.02 \cdot H$ $Ubc := 220 \cdot V$

$Z1 := R1$ $w := 2 \cdot \pi \cdot f$ $XL2 := w \cdot L2$ $Z2 := R2 + i \cdot XL2$

$Iz1 := \frac{Ubc}{Z1}$ $Iz1 = 44\,A$ $Iz2 := \frac{Ubc}{Z2}$ $Iz2 = (13.614 - 28.514i)\,A$

$|Iz1| = 44\,A$ $\arg(Iz1) = 0\,deg$ $|Iz2| = 31.597\,A$ $\arg(Iz2) = -64.477\,deg$

$Z12 := \frac{Z1 \cdot Z2}{Z1 + Z2}$ $Z12 = (3.067 + 1.518i)\,\Omega$ $I := \frac{Ubc}{Z12}$ $I = (57.614 - 28.514i)\,A$

$UL := RL \cdot I$ $UL = (86.421 - 42.771i)\,V$ $|I| = 64.284\,A$ $\arg(I) = -26.331\,deg$

$|UL| = 96.426\,V$ $\arg(UL) = -26.331\,deg$

$E := Ubc + RL \cdot I$ $E = (306.421 - 42.771i)\,V$ $|E| = 309.392\,V$ $\arg(E) = -7.946\,deg$

$Sc := Ubc \cdot \bar{I}$ $Sc = (12.675 + 6.273i)\,kW$

$\cos\phi := \frac{Re(Sc)}{|Sc|}$ $\cos\phi = 0.896$

2. Якщо трикутники струмів векторної діаграми, які відповідають електричному колу до і після приєднання компенсуючої ємності, замінити трикутниками потужностей, то вираз для визначення компенсуючої ємності можна привести до вигляду [4,5]:

$$C = \frac{P_C(tg(\varphi_1) + tg(\varphi_k))}{\omega U^2},$$

де P_C − активна потужність споживачів, ω − кутова частота струму, U − напруга на затискачах споживачів.

Обчислення значення компенсуючої ємності.

$\phi 1 := acos(\cos\phi)$ $\phi 1 = 26.331\,deg$ $\phi k := acos(0.995)$ $\phi k = 5.732\,deg$

$Ck := \frac{Re(Sc) \cdot (\tan(\phi 1) + \tan(\phi k))}{w \cdot Ubc^2}$ $Ck = 496.229\,\mu F$

Обчислення діючих значень струму в нерозгалуженій частині кола, струму в компенсуючої ємності, спаду напруги в лінії, ЕРС джерела, потужності і коефіцієнт потужності споживачів після приєднання компенсуючої ємності.

$Zc := -i \cdot \frac{1}{w \cdot Ck}$ $Ic := \frac{Ubc}{Zc}$ $Ic = 34.297i\,A$ $|Ic| = 34.297\,A$ $arg(Ic) = 90\,deg$

$Ik := Iz1 + Iz2 + Ic$ $Ik = (57.614 + 5.783i)\,A$ $|Ik| = 57.904\,A$ $arg(Ik) = 5.732\,deg$

$ULk := RL \cdot Ik$ $ULk = (86.421 + 8.675i)\,V$

$|ULk| = 86.856\,V$ $arg(ULk) = 5.732\,deg$

$Ek := Ubc + RL \cdot Ik$ $Ek = (306.421 + 8.675i)\,V$ $|Ek| = 306.544\,V$ $arg(Ek) = 1.622\,deg$

$Sck := Ubc \cdot \overline{Ik}$ $Sck = (12.675 - 1.272i)\,kW$

$cos\phi k := \frac{Re(Sck)}{|Sck|}$ $cos\phi k = 0.995$

3. Для побудови топографічної векторної діаграми (рис. 4.11) додатково потрібно визначити спади напруг активному опорі R_2 і індуктивності L_2.

$UR2 := R2 \cdot Iz2$ $UR2 = (68.07 - 142.57i)\,V$ $|UR2| = 157.986\,V$ $arg(UR2) = -64.478\,deg$

$UXL2 := XL2 \cdot Iz2$ $UXL2 = (179.159 + 85.539i)\,V$ $|UXL2| = 198.532\,V$ $arg(UXL2) = 25.522\,deg$

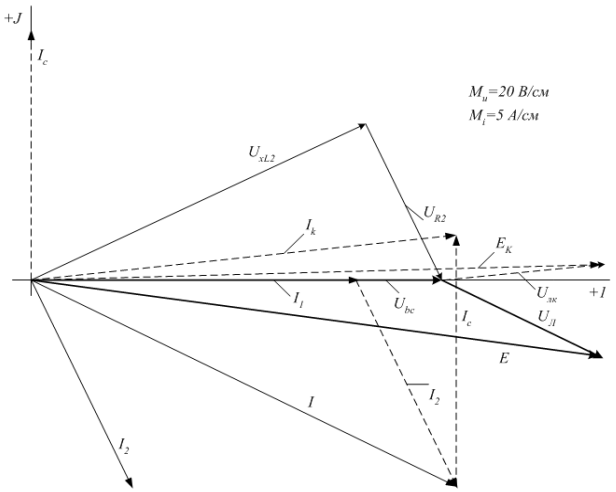


Рис. 4.11

Примітка: вектори топографічної векторної діаграми подані штриховими лініями відповідають випадку кола з компенсуючою ємністю (рис. 4.12).

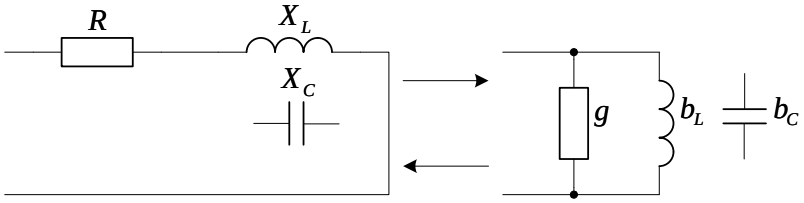


Рис. 4.12

В багатьох випадках в розрахунках електричних кіл з паралельним і змішаним з'єднаннями *R, L* і *C* елементів та в побудові еквівалентних схем електротехнічних пристроїв по результатам досліджень доцільно скористатись співвідношеннями між послідовною і паралельною еквівалентними схемами заміщення, які потрібно добре усвідомити:

$$g = \frac{R}{R^2 + X_L^2}; \quad g = \frac{R}{R^2 + X_C^2}; \quad b_L = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2}; \quad b_C = \frac{X_C}{R^2 + X_C^2};$$

$$R = \frac{g}{g^2 + b_L^2}; \quad R = \frac{g}{g^2 + b_C^2}; \quad X_L = \frac{b_L}{g^2 + b_L^2}; \quad X_C = \frac{b_C}{g^2 + b_C^2}.$$

Список питань для самоконтролю

1. Закони Ома та Кірхгофа в електричних колах змінного струму.
2. Індуктивність та ємність у колі синусоїдального струму.
3. Надати визначення реактивної провідності.
4. Потужність в колі синусоїдального струму. Поняття про баланс потужностей.
5. Розгалужені електричні кола. Алгоритм розрахунку розгалужених електричних кіл.

Розділ 2. Трифазні електричні кола
Тема 2.1. Трифазні електричні кола

Лекція 5. Трифазні електричні кола. Елементи трифазних кіл. Принцип дії трифазного генератора. Способи зображення симетричної системи ЕРС. Способи з'єднання фаз трифазного джерела живлення. Трипровідна і чотирипровідна система. Фазні та лінійні напруги. Класифікація і способи ввімкнення споживачів у трифазне коло. Симетричні режими трифазного кола.

Співвідношення між фазними та лінійними напругами і струмами при симетричних споживачах.

Трифазні електричні кола. Такими називають сукупність трьох електричних кіл в яких діють синусоїдальні ЕРС однакової частоти, що відрізняються одна від одної за фазою та утворюються в одному джерелі енергії. Кожне з таких кіл, що входить у трифазну систему, називають фазою.

Трифазне коло складається з трьох основних частин: трифазного генератора, лінії електропередач та споживачів електричної енергії.

Трифазний синхронний генератор. Найбільш розповсюдженим трифазним генератором є синхронна машина, що перетворює механічну енергію в електричну, рис. 5.1.

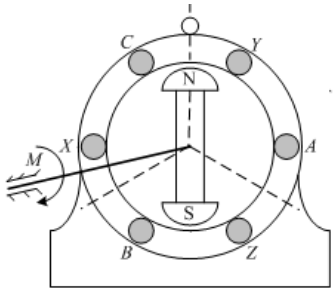


Рис. 5.1

В пазах нерухомої частини машини (статора) розміщуються три фазні обмотки таким чином, що їхні просторові вісі (на рисунку показані пунктиром) зміщені відносно одна одної на кут $2\pi/3$. Початки фазних обмоток позначають буквами *A, B, C*, а їх кінці − відповідно *X, Y, Z.*

Частина машини (ротор), яка зображена у вигляді постійного магніту, обертається з рівномірною швидкістю під дією обертового моменту *M* джерела механічної енергії. Його магнітне поле перетинає витки обмоток статора і, відповідно до закону електромагнітної індукції, наводить в них періодично змінні синусоїдальні ЕРС. Індуковані в обмотках ЕРС мають однакові частоти та амплітуди, але відрізняються одна від одної за фазою на кут $2\pi/3$ внаслідок просторового зсуву обмоток. Таку систему ЕРС називають симетричною, рис. 5.2.

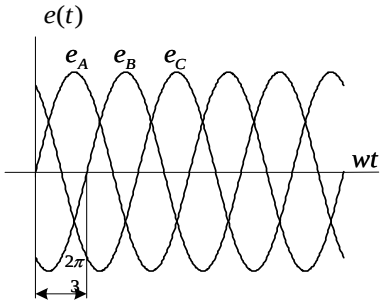


Рис. 5.2

На рисунку ЕРС обмотки фази *A* прийнята за вихідну з нульовою початковою фазою. Тоді систему трифазних ЕРС можна записати у вигляді [4,5]:

$$e_A = E_m \sin wt;$$
$$e_B = E_m \sin(wt - 2\pi/3);$$
$$e_C = E_m \sin(wt - 4\pi/3).$$

Відповідно до комплексної форми запису ЕРС, маємо [4,5]:

$$\dot{E}_A = E_m e^{j0^\circ} = E_m;$$
$$\dot{E}_B = E_m e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E_m e^{-j120^\circ};$$
$$E_C = E_m e^{-j\frac{4\pi}{3}} = E_m e^{-j240^\circ},$$

що відповідає векторній діаграмі, рис. 5. 3.

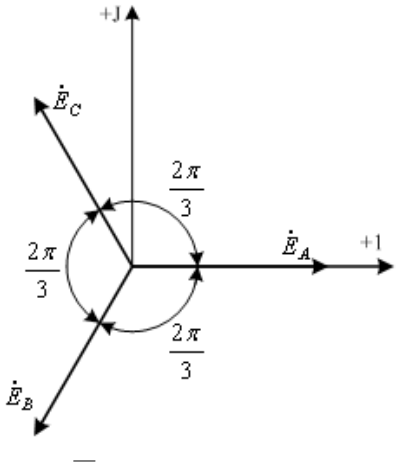


Рис. 5.3

З часового графіка та векторної діаграми випливає вираз для симетричної трифазної системи ЕРС [4,5]:

$$e_A+e_B+e_C=0;$$
$$\dot{E}_A+\dot{E}_B+\dot{E}_C=0.$$

Систему ЕРС, у якій ЕРС фази *B* відстає за фазою від ЕРС фази *A*, ЕРС фази *C* відстає від ЕРС фази *B*, а ЕРС фази *A* відстає від ЕРС фази *C,* називають системою прямої послідовності. Якщо змінити напрям обертання ротора генератора, послідовність фаз зміниться і буде називатись зворотною. Надалі будемо розглядати трифазні кола тільки з прямою послідовністю фаз.

На електричних схемах обмотку (чи фазу) генератора зображують так, як показано на рис. 5.4. За умовний додатній напрям ЕРС приймають напрям від кінця обмотки до її початку.

Основний спосіб з'єднання обмоток генератора − **зірка**. В цьому випадку кінці обмоток генератора *X, Y, Z* з'єднують в вузол *N*, який називають нейтральним, рис. 5.4.

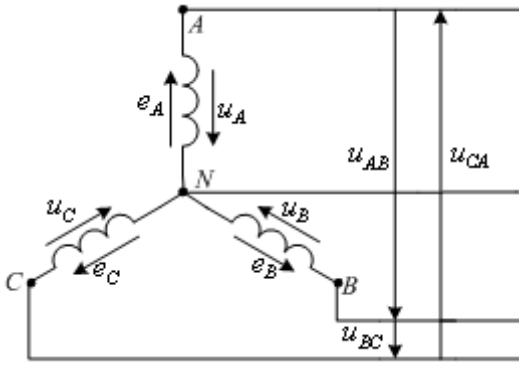


Рис. 5.4

Напруги між виводами кожної фазної обмотки генератора називають фазними *(u_A, u_B, u_C)*, а між однойменними виводами різних фаз − між фазними, або лінійними *(u_{AB}, u_{BC}, u_{CA})*.

Відповідно до прийнятих додатних напрямків напруг можна скласти рівняння за другим законом Кірхгофа [4,5]:

$$u_{AB}=u_A-u_B,\quad u_{BC}=u_B-u_C,\quad u_{CA}=u_C-u_A,$$

або в комплексній формі [4,5]:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB}&=\dot{U}_A-\dot{U}_B,\\ \dot{U}_{BC}&=\dot{U}_B-\dot{U}_C,\\ \dot{U}_{CA}&=\dot{U}_C-\dot{U}_A\end{aligned}.$$

На комплексній площині (рис. 5.5) подана векторна діаграма відповідно до комплексних значень симетричної системи фазних *($U_A=U_B=U_C=U_Ф$)* і лінійних *($U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=U_Л$)* напруг генератора за умови, що початкова фаза напруги фази *A* дорівнює нулю, $\Psi_{uA}=0$ [4,5]:

$$\dot{U}_A = U_Ф e^{j0^\circ},\ \dot{U}_B = U_Ф e^{-j120^\circ},$$

$$\dot{U}_C = U_Ф e^{-j240^\circ} = U_Ф e^{j120^\circ},\ \dot{U}_{AB} = U_Л e^{j30^\circ},\ \dot{U}_{BC} = U_Л e^{-j90^\circ},\ \dot{U}_{CA} = U_Л e^{-j210^\circ} = U_Л e^{j150^\circ}.$$

Із співвідношень сторін трикутника з гіпотенузою $U_Ф=U_A$, катетом $\frac{U_Л}{2}$ і кутом 30° (рис. 5.5) маємо рівність $U_Л = \sqrt{3}U_Ф$ для симетричної трифазної системи напруг, коли обмотки генератора з'єднані **зіркою**.

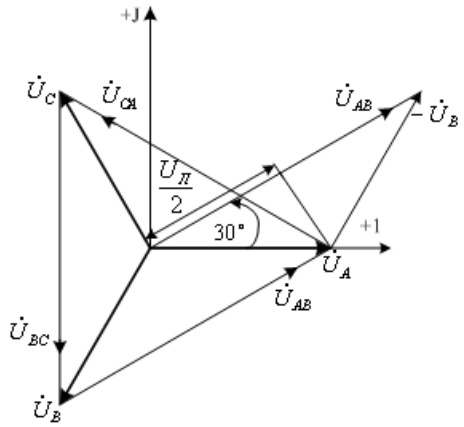


Рис. 5.5

Споживачі електричної енергії, що приєднуються в трифазне коло, можуть бути як однофазними (наприклад, освітлювальні прилади, житлові квартири, ряд нагрівальних приладів та ін.), так і трифазними (асинхронні та синхронні двигуни, електричні печі та ін.). В залежності від навантаження фаз споживачі діляться на симетричні та несиметричні. Симетричними називають споживачі, комплексні опори фаз яких рівні між собою:

$$\underline{Z}_a=\underline{Z}_b=\underline{Z}_c=\underline{Z}e^{j\varphi}.$$

Якщо ці умови не виконуються, то споживачі називають несиметричними.

Список питань для самоконтролю

1. Надати визначення трифазних електричних кіл.
2. Навести приклад найбільш розповсюдженого трифазного генератора.
3. Яка система електрорушийних сил є симетричною?
4. Назвіть основний спосіб з'єднання обмоток генератора.
5. Надати пояснення стосовно умов при яких споживач вважається симетричним.

Розділ 3. Електронні напівпровідникові прилади
Тема 3.1. Напівпровідникові переходи й контакти

Лекція 6. Електропровідність напівпровідників. Домішкові напівпровідники. Явище *p-n* переходу та його властивості. Вольт-амперна характеристика *p-n* переходу. Пробій *p-n* переходу. Ємності *p-n* переходу.

Відомо [6], що усі речовини утворені атомами, які складаються із додатно заряджених ядер і від'ємно заряджених електронів, які обертаються навколо них. Ядра складаються з електрично нейтральних нейтронів і додатно заряджених протонів. Кількість протонів в ядрі визначають його заряд. Число електронів, що обертаються навколо ядра у нормальному стані, утворюють електронну оболонку атома, в результаті чого атом є електронейтральним. Електрони обертаються навколо ядер по орбітах і згруповані у відповідні шари, що мають строго визначену енергію. Електрони найбільш віддаленої орбіти мають найбільшу енергію і називаються валентними. Під впливом енергії тепла, світла, радіації чи інших зовнішніх факторів валентні електрони можуть одержати енергію і перейти на більш віддалену від ядра орбіту тобто стати збудженими. В разі одержання електроном енергії, що перевищує роботу виходу, він покидає поверхню речовини.

В кристалах виникає взаємодія між сусідніми атомами, що приводить до розщеплення енергетичних рівнів електронів і утворення енергетичних зон. Сукупність енергетичних рівнів найбільш віддалених валентних електронів утворюють валентну зону. Дозволені але не зайняті електронами енергетичні рівні називаються зоною провідності або вільною зоною. Між валентною зоною і зоною провідності може находитись заборонена зона. Якщо в зону провідності потрапляють збуджені електрони валентної зони, то це буде забезпечувати провідність речовини. Зонна структура речовин пояснює різницю між провідниками, напівпровідниками і діелектриками.

На рис. 6.1 показані енергетичні зони для цих речовин. Характерною особливістю провідників є те, що у них валентна зона (ВЗ) і зона провідності (ЗП) перекриваються (рис. 6.1).

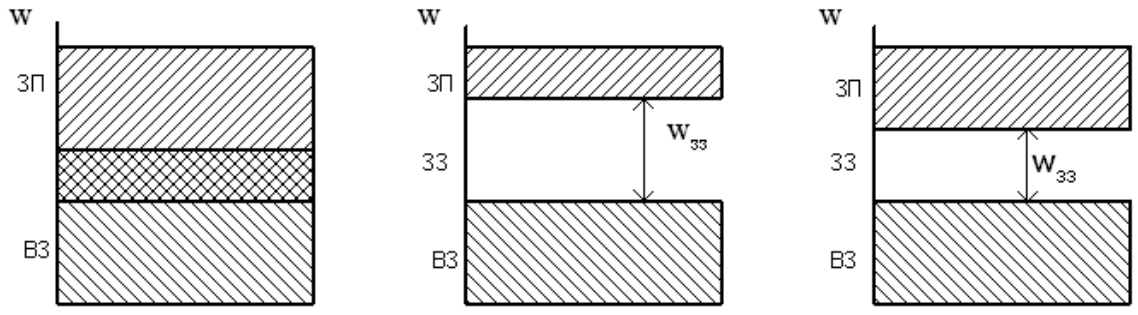


Рис. 6.1

Валентні електрони легко переходять у вільну зону (ВЗ) (зону провідності), що і забезпечує їх хорошу провідність уже при температурі абсолютного нуля (-273^0 *C*). Діелектрики і напівпровідники відрізняються від провідників присутністю у них між ВЗ і

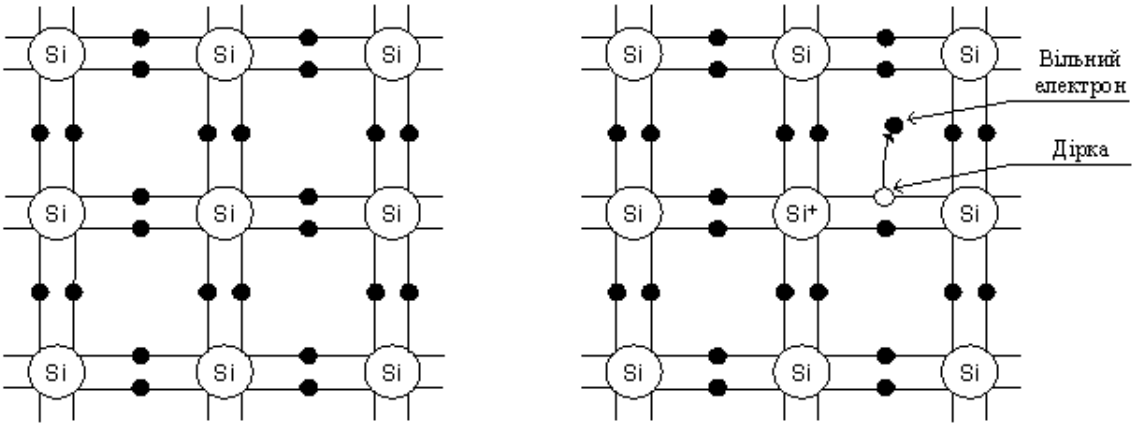
ЗП ще забороненої зони (ЗЗ), у якій не можуть находитись електрони. З точки зору зонної теорії діелектрики і напівпровідники відрізняються поміж собою шириною ЗЗ ($W_{ЗЗ}$). До діелектриків (рис. 1, б) відносять матеріали, у яких $W_{ЗЗ} > 6$ *еВ* (електрон − вольт). Напівпровідникові матеріали, що знаходять технічне використання, мають $W_{ЗЗ} = (0{,}1 \div 3)$ *еВ* (рис. 1, в). Кремній має $W_{ЗЗ(Si)} = 1{,}12$ *еВ*, а германій – $W_{ЗЗ(Ge)} = 0{,}72$ *еВ*.

Як відзначалось вище енергія електронів залежить від температури, а тому при температурі абсолютного нуля (-273^0 С) їх енергія менше ширини забороненої зони, тобто, напівпровідники при таких умовах не проводять струм. З підвищенням температури провідність напівпровідників зростає через підвищення енергії валентних електронів до величини більшої $W_{ЗЗ}$.

Для виготовлення напівпровідникових приладів використовуються як прості (германій, кремній, селен) так і складні (арсенід галію, фосфід галію) матеріали.

Розглянемо структуру напівпровідників на прикладі кремнію (*Si*), що є елементом IV групи таблиці Менделєєва. Кристалічні гратки кремнію представляють правильний тетраедр, у вузлах якого розміщені атоми на відстані $\approx 2{,}4 \cdot 10^{-10}$ см один від іншого. Зв'язок між атомами здійснюється за допомогою ковалентних (подвійних) зв'язків 4-х валентних електронів (рис. 6.2, а). При температурі абсолютного нуля в напівпровідникові вільні електрони відсутні і, якщо помістити такий напівпровідник в електричне поле, то буде відсутній і електричний струм.

Внаслідок дії температури чи інших чинників енергія деяких валентних електронів зростає. В наслідок цього вони розривають ковалентні зв'язки і стають вільними. Атом, якого залишив електрон, перетворюється в позитивно заряджений іон. Цей позитивний заряд умовно приписується розірваному ковалентному зв'язку, який називають **діркою** (зображена кружком, рис. 6.2, б).



а) б)

Рис. 6.2

Якщо помістити такий напівпровідник в електричне поле, то виникне направлений рух електронів і дірок, тобто електричний струм. Таку провідність хімічно чистих напівпровідників називається власною. Вона забезпечується в однаковій мірі дірками таелектронами.

Домішкові напівпровідники. Процес внесення домішок до вихідного напівпровідника називають легуванням. В якості домішок використовують елементи IIIг

групи (*In* – індій, *Ga* – галій, *B* –бор) або V групи (*Sb* – сурма, *As* – миш'як, *P* – фосфор) таблиці Менделєєва. Елементи III групи називають акцепторними, а V – донорними домішками. Якщо деякі атоми кремнію замістити акцепторною домішкою (наприклад, 3-х валентним індієм), то з одним із атомів кремнію атом індію буде зв'язаний тільки за рахунок атому кремнію, тому що *In* має тільки три валентних електронів, а сусідів в кристалі у нього чотири (рис. 6.3, а).

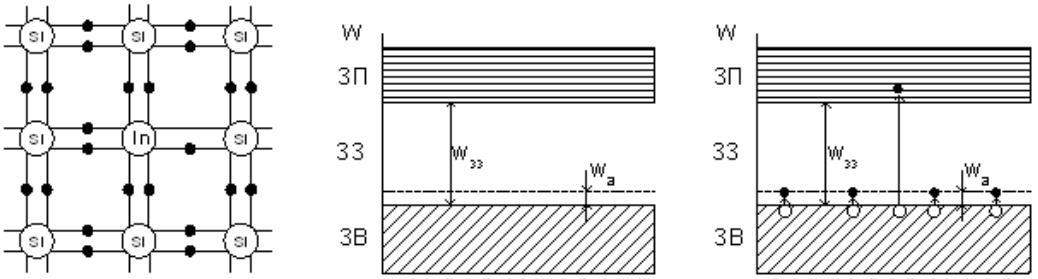
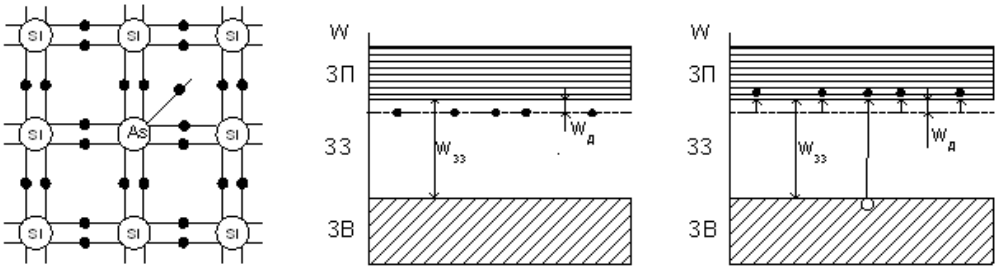


Рис. 6.3

В цьому випадку енергетичні рівні валентних електронів індію будуть знаходитись у забороненій зоні кремнію поблизу його валентної зони (рис. 6.3, б). Енергетичні рівні індію не будуть перетворюватись в енергетичну зону через значну віддаленість їх поміж собою (один атом індію припадає на $10^6 \div 10^7$ атомів кремнію). Між енергетичним рівнем індію і валентною зоною кремнію має місце заборонена зона $w_a \approx 0{,}1\ eB$. Енергетичні рівні індію при температурі абсолютного нуля будуть вільні від електронів. В разі підвищення температури енергія валентних електронів кремнію зростає. При її величині більшої w_a збуджені валентні електрони кремнію переходять на валентні рівні індію, а атоми кремнію перетворюються в позитивно заряджені іони, тобто у валентній зоні кремнію з'являться дірки. При більш високих температурах розриваються ковалентні зв'язки кремнію, що спричиняє появі додатково однакової кількості дірок у валентній зоні і електронів у зоні провідності кремнію.

Таким чином, у напівпровідника з акцепторною домішкою (рис. 6.3, в) кількість дірок (p_p) буде більшою ніж електронів (n_p), що забезпечує в основному його діркову провідність. Дірки при цьому називаються основними носіями а електрони – неосновними. Напівпровідник з дірковою провідністю називають напівпровідником *p*-типу. Якщо до кремнію ввести атоми п'ятивалентного елементу (наприклад, *As* – миш'яку), то чотири його валентних електронів будуть взаємодіяти з сусідніми атомами кремнію, а п'ятий – буде обертатися навколо атому миш'яку (рис. 6.4, а).



а) б) в)

Рис. 6.4

Валентні електрони п'ятивалентної домішки утворюють у верхній частині забороненої зони кремнію енергетичний рівень, який утворює із зоною провідності кремнію заборонену зону $w_a \approx 0{,}1$ *eB* (рис. 6.4, б). Такий зв'язок значно слабкіший ніж ковалентний, тому уже при невеликих температурах цей зв'язок розривається і електрони донорної домішки (миш'яку) стають вільними тобто переходять у зону провідності кремнію. При більш високих температурах валентні електрони кремнію, в разі збільшення їх енергії на величину >Wзз, переходять у зону провідності, тобто у валентній зоні кремнію з'являються дірки, а у зоні провідності − така ж кількість електронів (рис. 6.4, в). Таким чином, у напівпровідників з донорними домішками кількість вільних електронів (*nn*) буде значно більше ніж дірок (*pn*) (*nn » pn*), що зумовлює їх в основному електронну провідність.

Електрони через це називаються основними носіями зарядів, а дірки – неосновними. Домішкові напівпровідники з переважно електронною провідністю називаються напівпровідниками *n*-типу.

Явище *p-n* переходу та його властивості. Якщо два напівпровідника з різними типами провідності привести до контакту, то на границі їх розділу буде мати місце різниці концентрації вільних носіїв зарядів одного знаку (рис. 6.5), тобто *pp » pn та nn » np*

За рахунок дифузії електрони з n області, де їх концентрація вища, будуть переміщуватись в область p, де їх концентрація нижча, рекомбінуючи там з дірками. Дірки *p* - області, навпаки, будуть переходити в область *n*, рекомбінуючи там з електронами. В результаті таких переміщень на границі поділу напівпровідників в *n* області залишаються позитивно заряджені іони (атоми п'ятивалентних домішок, що втратили електрон), а в області p – негативно заряджені іони акцепторних домішок, які придбали електрони. Треба мати на увазі, що іони є нерухомі. Таким чином, дифузія основних носіїв заряду приводить до створення приграничного шару l (*p-n* - переходу), одна сторона якогоз аряжена негативно (*p* - область), а інша – позитивно (*n*- область). Різниця потенціалів, створена цими зарядами називається контактною різницею потенціалів або потенціальним бар'єром U_K (рис. 6. 5).

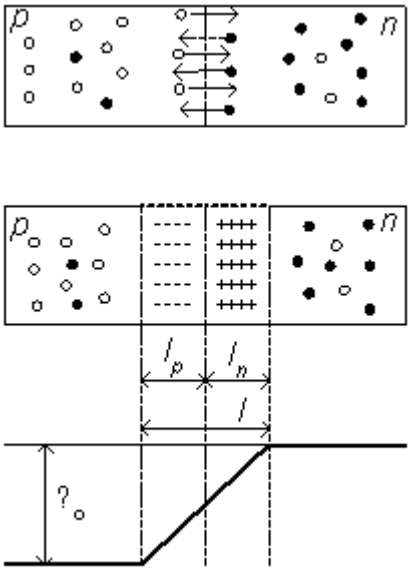


Рис. 6.5

Цей бар'єр спричиняє гальмівну дію для основних і пришвидшуючу − для неосновних носіїв зарядів. Внутрішнє поле переходу забезпечує рівність потоків носіїв зарядів в обох напрямках, тобто рівність нулю сумарного струму через p-n перехід в разі відсутності зовнішнього електричного поля.

Електрони, що приходять до *p-n* переходу з боку *n* області, відштовхуються від'ємними іонами, а дірки p області – позитивними іонами.

Таким чином, *p-n* переходом будемо називати область на границі поділу двох напівпровідників з різними типами провідності, яка має відповідної ширини область збіднену рухомими носіями, володіє потенціальним бар'єром і значним внутрішнім опором.

Якщо концентрація домішок в *p* і *n* областях різна, то *p-n* перехід буде більш глибоко проникати в ту область, концентрація домішок в якої менше, тобто

$$ln \neq lp.$$

Величина потенціального бар'єру UK залежить від співвідношення концентрації носіїв зарядів одного знаку по обидві сторони переходу і визначається співвідношенням

$$UK = \varphi m \ ln(pP/pn) = \varphi_m \ ln(nn/np),$$

де $\varphi_m = KT/q$ – тепловий потенціал, K– стала Больцмана, T–температура в градусах Кельвіна, q - заряд електрона.

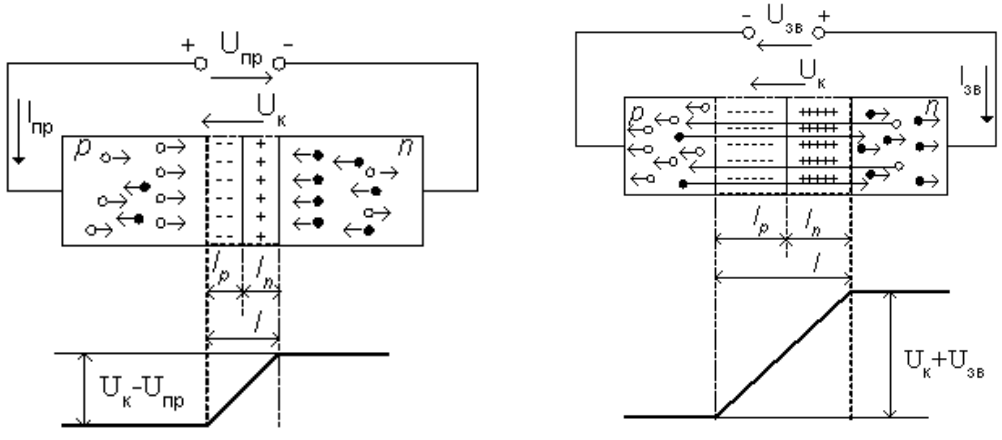
У випадку, коли $T = 2930\ K$ (кімнатна температура), $\varphi_m = 0{,}026\ eB$.

Потенціальний бар'єр U_K для кремнієвих напівпровідників має величину

$$U_K(Si) = 0{,}7 \div 0{,}8 \text{ eB},$$

для германієвих – $U_K(Ge) = 0{,}3 \div 0{,}4\ eB$, а їх ширина – долі одиниці *мкм*.

Вольт-амперна характеристика *p-n* переходу. Розглянемо вплив на *p-n* перехід зовнішньої напруги. Якщо до *p-n* переходу підвести зовнішню напругу, полярність якої



а) б)

Рис. 6.6

то дірки *p* - області, відштовхуючись від додатного потенціалу зовнішнього джерела, наближаються до *p-n* переходу. Це приводить до часткової рекомендації з негативними іонами акцепторної домішки і звуження *p-n* переходу з боку *p* - області.

Аналогічно, електрони *n* - області, зміщуючись під впливом негативного полюсу зовнішньої напруги до p-n переходу, рекомбінують з додатними іонами донорної домішки звужують p-n перехід з боку n області.

Потенціальний бар'єр *p-n* переходу зменшується, що приводить збільшення дифузійних переміщень через нього основних носіїв зарядів.

Через *p-n* перехід у зовнішньому колі виникає струм, який називається прямим струмом *Inp p-n* переходу, а зовнішня напруга з розглянутою полярністю – прямою напругою *Unp*.

Якщо змінити полярність зовнішнього джерела напруги на протилежну (в цьому разі напругу будемо називати зворотною *Uзв*), то основні носії зарядів (дірки *p* - області і електрони *n* - області) будуть притягуватись до відповідних полюсів зовнішнього джерела напруги (рис. 6.6, б).

Це приведе до розширення *p-n* переходу і збільшення його потенційного бар'єру на величину зовнішньої напруги.

Неосновні носії зарядів (електрони *p* - області і дірки *n* - області) будуть відштовхуватись від полюсів зовнішнього джерела напруги і зміщуватися до *p-n* переходу.

Поле *p-n* переходу учиняє на неосновні носії зарядів притягувану дію, а тому вони цим полем (дрейфовим способом) будуть переміщуватись через перехід і зумовлювати через *p-n* перехід і у зовнішньому колі струм, який називається зворотним струмом *Ізв*.

Таким чином, зворотний струм є струмом неосновних носіїв, які, як відомо, в основному виникають під дією температури. Тому зворотний струм ще називають тепловим. Струму через *p-n* перехід визначається залежністю

$$I_{p-n} = I_0 \left(e^{\frac{\pm U_{ЗН}}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

де I_0 – зворотній струм насичення, "+" – відповідає прямій зовнішній напрузі, а "–" – зворотній, φ_T – тепловий потенціал.

На рис. 6.7 наведені вольт-амперні характеристики (ВАХ) ***p-n*** переходу, побудовані згідно вище поданого виразу для різних зовнішніх температур.

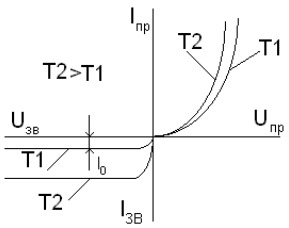


Рис. 6.7

Як відомо, прямий струм *p-n* переходу утворюється основними носіями, а зворотний - неосновними. Через те, що концентрація основних носіїв заряду на декілька порядків перевищує концентрацію неосновних носіїв, прямий струм на декілька порядків більший ніж зворотній. Цим зумовлюються вентильні властивості *p-n* переходу.

Пробій *p-n* переходу. Під пробоєм *p-n* переходу розуміють явище різкого збільшення струму через перехід. В залежності від причин, які спричиняють зростання струму через p-n перехід розрізняють тепловий і електричний пробої. Електричний пробій буває лавинним і тунельним.

Тепловий пробій зумовлюється збільшенням числа носіїв заряду в *p-n* переході за рахунок їх термогенерації, якщо відведення від переходу в навколишній простір в одиницю часу тепла буде меншим ніж його збільшення під дією струму (рис. 6. 8, гілка 1).

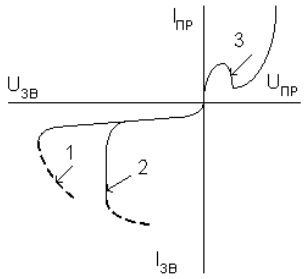


Рис. 6.8

Це приводить до надмірного розігріву *p-n* переходу та його розплавлення. Цей пробій є незворотнім.

Лавинний пробій. Цей пробій зумовлений лавинним розмноженням носіїв заряду у разі ударної іонізації атомів швидкими носіями.

Сутність його у тому, що неосновні носії заряду у *p-n* переході під дією зворотної напруги прискорюються полем і при русі в ньому зштовхуються з атомами кристалічних ґраток. При відповідній напруженості електричного поля носії заряду набувають енергію достатню для вибивання валентних електронів, тобто появі додаткових пар носіїв заряду – електронів і дірок. Ці заряди, в свою чергу, прискорюються і в разі зіткнення з атомами також утворюють додаткові носії заряду. Цей процес носить лавинний характер і може відбуватись у відносно широких p-n переходах. Збільшення струму переходу (збільшення рухомих носіїв заряду в *p-n* переході) приводить до зменшення його опору, внаслідок чого напруга на p-n переході залишається практично незмінною (гілка 2 на рис. 6. 8).

Цей процес буде зворотнім, якщо зростання струму не спричинить накопиченню тепла в *p-n* переході. У разі порушення рівноваги між накопиченням тепла в p-n переході і його віддачею в навколишній простір наступає тепловий пробій (пунктирна частина гілки 2).

Тунельний пробій. В основі тунельного пробою лежить явище безпосереднього відриву валентних електронів від атомів кристалічних ґраток під впливом великого електричного поля. Утворені таким чином додаткові дірки і електрони збільшують струм через p-n перехід. Тунельний пробій відбувається у вузьких p-n переходах, в яких при порівняно невеликій напрузі має місце висока напруженість електричного поля (рис. 6.8, гілка 3).

В кремнієвих напівпровідниках тунельний пробій наступає при напруженості

$$U_к \geq 4 \cdot 10^5 B / см ,$$

а у германієвих при

$$U_к \geq 2 \cdot 10^5 B / см .$$

Тунельний пробій є зворотнім.

Ємності *p-n* переходу. Зазвичай виділяють дві ємності: дифузійну і бар'єрну. Дифузійна ємність – це ємність прямо зміщеного *p-n* переходу

$$C_Д = dQ_З / dU = I \cdot \tau / \varphi_т,$$

де $\varphi_т$ - час життя неосновних носіїв заряду.

Зворотно зміщений *p-n* перехід характеризується бар'єрною ємністю

$$C_Б = (\xi_0 \cdot \xi_{НП} \cdot S_i / \ell) \sqrt{U_К / U_{ЗВ}},$$

де ξ_0 і $\xi_{НП}$ - відповідно діелектрична проникність вакууму і напівпровідника, S_i – площа *p-n* переходу, ℓ - ширина *p-n* переходу, $U_К$ – висота потенційного бар'єру, $U_{ЗВ}$ – величина зворотної напруги.

Список питань для самоконтролю

1. Надати визначення пробою *p-n* переходу.
2. Надати визначення теплового пробою.
3. Надати визначення лавинного пробою.
4. Надати визначення тунельного пробою.
5. Надати визначення дифузійної ємності.

Розділ 4. Електронні пристрої
Тема 4.1. Випрямлячі та перетворювачі

Лекція 7. Напівпровідникові прилади. Резистори. Випрямлячі. Їх класифікація, галузі застосування. Структурна схема.

Напівпровідникові прилади. Резистори. Відомо [7,8], що напівпровідникові (НП) резистори це прилади з двома виводами , електричні властивості яких залежать від типу і міри легірування домішок в напівпровідникових матеріалах. Умовні позначення деяких з них подані на рис. 7.1: лінійні резистори (а), тензорезистори (б), терморезистори: (термістори і позістори – в) та фоторезистори (г). Удільний опір перших слабо залежать від зовнішніх факторів. Практично не залежать він і від зміни в широкому діапазоні напруги і струму. Тому вони використовуються в інтегральних мікросхемах. Для останніх напівпровідникових резисторів, навпаки, характерна сильна залежність їх удільного опору від різних зовнішніх факторів: механічних дій, зовнішньої температури та світлового потоку, відповідно. Тому вони використовуються в якості первинних перетворювачів неелектричних величин в електричні (датчиків).

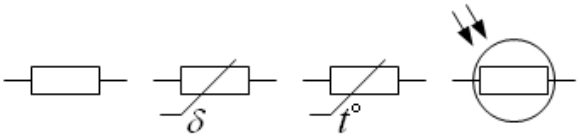


Рис. 7.1

Діоди. Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з одним ***p-n*** переходом і двома виводами.

За функціональним призначенням, принципом створення ***p-n*** переходу і використанню тих чи інших його властивостей діоди діляться на випрямні, імпульсні, високочастотні, стабілітрони, тунельні, варікапи, фотодіоди, світлодіоди та інші. Умовні позначення діодів на схемах приведені на рис. 7.2.

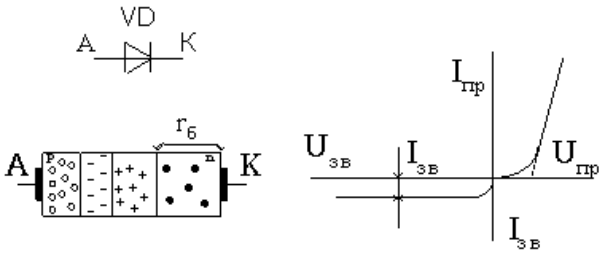


Рис. 7.2

Більшість діодів виконують на основі несиметричних ***p-n*** переходів. Вивід від ***p***-області називають анодом, а від ***n***-області – катодом. Розглянемо особливості побудови, характеристики і параметри найбільш вживаних діодів.

Випрямні діоди. Випрямні діоди призначені для випрямлення змінного струму низької частоти. Електронно-дірковий перехід має площинну конструкцію, щоб пропускати великі струми і виконується на високоомному матеріалі (для одержання великих зворотних напруг). Вони виконуються на основі несиметричних ***p-n*** переходів. Область з малою концентрацією домішок, яка називається базою, має опір $r_б$=*1÷30 Ом*, яка з'єднана послідовно з ***p-n*** переходом (рис. 7.2, а). Збільшення прямої напруги знижує висоту потенціального бар'єру і він перестає впливати на величину прямого струму. Прямий струм через діод буде визначатися лише величиною $r_б$ і лінійно залежати від прямої напруги $U_{ПР}$, рис. 7.2, б. Цей відрізок ВАХ називається омічним і є робочим.

Основними параметрами випрямних діодів є:

$I_{пр\ ср}$ – максимальне значення прямого струму через діод;

$I_{зв}$ – зворотній струм через діод при максимальній температурі;

$U_{пр}$ – середнє значення спаду напруги на діоді при $I_{пр\ ср}$;

$U_{зв\ max}$ – максимально допустима зворотна напруга;

Стабілітрони. Стабілітрон це напівпровідниковий діод, робота якого базується на використанні явища електричного пробою ***p-n*** переходу.

У низьковольтних стабілітронів (з малим опором бази) найбільш можливий тунельний пробій, а у стабілітронів з високоомною базою пробій має лавинний характер. На рис. 7.3 наведено умовне зображення стабілітрона та його вольт–амперна характеристика.

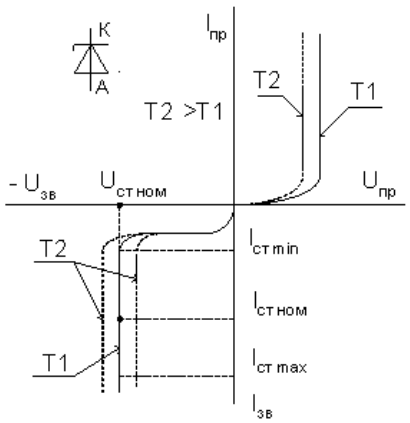
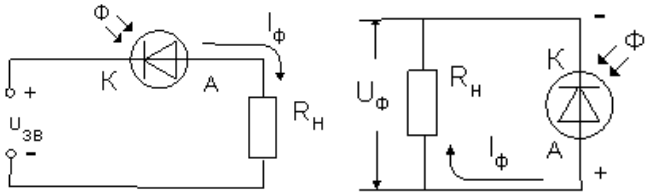


Рис. 7.3

Основні параметри стабілітронів: $U_{ст\ ном}$ – номінальна напруга стабілізації, $I_{ст\ min}$ – мінімальний струм стабілітрона, $I_{ст\ ном}$ – номінальний струм стабілітрона, $I_{ст\ max}$ – максимальний струм стабілітрона.

Фотодіоди. Фотодіоди – це фотоелектричні прилади з одним ***p-n***, параметри яких змінюються під дією квантів променевої енергії. Робота фотодіодів базується на явищі внутрішнього фотоефекту, сутність якого полягає в іонізації атомів кристалічних граток напівпровідника чи домішок у ньому квантами променевої енергії. В разі іонізації атомів вихідного напівпровідника генеруються електронно-діркові пари, які підвищують провідність

напівпровідника. Фотоефект виникає у разі перевищення енергії квантів світла ширини забороненої зони. Фотодіод може працювати як із зовнішнім джерелом живлення (фотодіодний режим, або режим фотоперетворювача (ФП), рис. 7.4, а) так і без нього (режим фотогенератора, рис. 7.4, б).



а) б)

Рис. 7.4

Світлодіоди. Світлодіоди – це напівпровідникові прилади, які, за рахунок процесів що відбуваються в ***p-n*** переході при протіканні через нього прямого струму, генерують оптичне випромінювання. Випромінювання відбувається за рахунок рекомбінації носіїв заряду у високоомній області (базі). Неосновні носії заряду, які інжектуються із емітера, рекомбінують у базі з основними носіями заряду (переходять із зони провідності у валентну зону). При цьому випромінюється вивільнена енергія у виглядів квантів світла. Довжина хвилі λ випромінювального світла однозначно визначається енергією кванта, яка приблизно дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника.

Колір випромінювального світла залежить від довжини хвилі λ, яка залежить від матеріалу напівпровідника. Світлодіоди із арсеніду галію ($\lambda=0,9\div1,4$ *мкм*) випромінюють інфрачервоне випромінювання, з фосфіду галію ($\lambda=0,7$ *мкм*) – червоне, з карбіду кремнію ($\lambda=0,53$ *мкм*) – жовто-зелене випромінювання. Умовне зображення світлодіодів наведено на рис. 7.5.

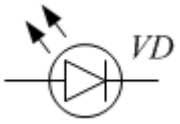


Рис. 7.5

Світлодіоди широко використовуються в якості індикаторних приладів та швидкодіючих джерел світла (їх перемикання відбувається за $10^{-7} \div 10^{-9}$ с).

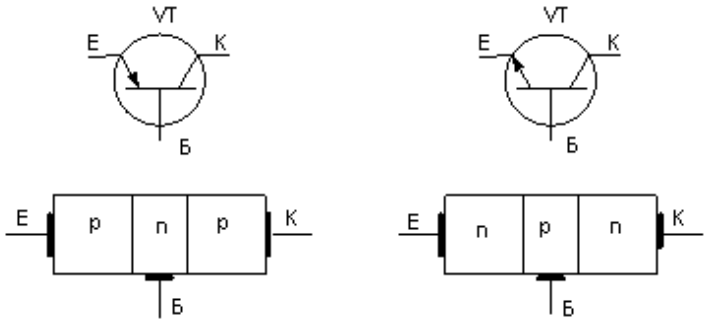
Список питань для самоконтролю

1. Надати визначення напівпровідникового діоду.
2. В чому полягає призначення випрямних діодів?
3. Надати визначення фотодіодів.
4. Надати визначення світлодіодів.
5. Фізичні принципи дії світлодіодів.

Тема 4.2. Підсилювачі та генератори

Лекція 8. Напівпровідникові підсилювачі. Класифікація та технічні показники. Транзисторні підсилювачі за схемою ОБ, ОЕ, ОК. Температурна стабілізація. Зворотні зв'язки в підсилювачах. Підсилювачі постійного струму.

Біполярні транзистори (БТ). Відомо [7,8], що біполярний транзистор – це тришарова структура ***n-p-n*** або ***p-n-p*** типу, яка має два ***p-n*** переходи і виводи від кожного шару. За послідовністю чергування типу шарів біполярні транзистори поділяються на ***p-n-p*** транзистори (рис. 8.1, а) та ***n-p-n*** транзистори (рис. 8.1, б).



а) б)

Рис. 8.1

На цьому ж рисунку наведено умовні графічні зображення транзисторів на принципових електричних схемах та їх символьне позначення (*VT*). Шар, що є джерелом носіїв заряду (електронів або дірок), називається емітером (Е), шар, який збирає заряди називається колектором (К), а центральний шар − базою (Б). Назву біполярний транзистор має тому, що струм у нього створюється двома типами носіїв заряду: дірками і електронами.

У будові емітера, бази і колектора є свої особливості. Виготовляючи транзистор, концентрацію основних носіїв в емітері (введенням домішки) роблять більшою ніж у колекторі, а концентрація основних носіїв у базі набагато менше ніж в колекторі, а тим більше ніж в емітері. Електронно-дірковий перехід між емітером і базою називається емітерним, а між базою і колектором - колекторним. На умовному зображенні транзисторів емітер позначається стрілкою, яка завжди направлена від ***p*** області до ***n*** області. Шари напівпровідників утворюють два ***p-n*** переходи емітерний ($П_е$) і колекторний ($П_к$). Полярність зовнішніх джерел вибирають такими, щоб емітерний перехід був зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному. Це приводить до зменшення потенціального бар'єру емітерного переходу і збільшення потенціального бар'єру колекторного переходу. В результаті зменшення бар'єру емітерного переходу відбувається дифузія дірок з емітера в базу і електронів із бази в емітер. Електронною складовою дифузійного струму через емітерний перехід можна знехтувати, тому що

$$p_p >> n_n.$$

Таким чином, струм емітера I_e утворюється за рахунок дифузійного переміщення дірок через емітерний перехід. Під дією сил дифузії дірки рухаються через базу в напрямку колектора, частково рекомбінують з електронами бази, утворюючи базовий струм $I_б$. Оскільки база є тонкою і має малу концентрацію домішок, то основна частина дірок інжектованих емітером досягає колекторного переходу. Полем колекторного переходу, зміщеного у зворотному напрямку дірки переміщуються у колекторний шар, створюючи колекторний струм $I_к$, тобто емітерний струм дорівнює сумі колекторного і базового струмів і їх зв'язок підпорядкований першому закону Кірхгофа $I_e = I_к + I_б$.

Відношення колекторного струму $I_к$ транзистора до емітерного струму I_e називається коефіцієнтом передачі струму емітера

$$\alpha = I_к / I_e.$$

Коефіцієнт α менший одиниці і знаходиться в межах 0,9 ... 0,999.

Використовуючи наведені вирази можна визначити зв'язки між колекторним і базовим, а також емітерним і базовим струмами:

$$I_к = [\alpha/(1-\alpha)] I_б = \beta I_б \; ; \quad I_e = [1/(1-\alpha)] I_б = (1+\beta) I_б,$$

де $\beta = \alpha/(1-\alpha)$ – коефіцієнт підсилення транзистора за струмом.

Коефіцієнт підсилення струму бази транзисторів знаходиться у межах

50...200.

Присутність у базовій та колекторній областях власних неосновних носіїв заряду, для яких зворотно зміщений перехід є прискоруючим, приводить до появи додаткової некерованої складової струму колектора $I_{к0}$. Оскільки основною причиною появи неосновних носіїв заряду є температура, то цей струм ще називають тепловим. У базовому колі тепловий струм направлений назустріч базовому струму, що зменшує його величину. Таким чином, загальний струм колектора складається з керованої ($\beta I_б$) і некерованої (теплової $I_{к0}$) складових

$$I_к = \beta I_б + I_{к0}.$$

Базовий струм з урахуванням теплової складової буде дорівнювати

$$I_б = I_e/(1+\beta) - I_{к0} = I_к/\beta - I_{к0}.$$

У транзисторах *n- p- n* типу назви функції усіх трьох шарів аналогічні розглянутого *p- n- p* транзистора, змінюється тільки тип носіїв заряду і полярність зовнішніх джерел живлення.

Схеми вмикання транзисторів. В залежності від того, який електрод транзистора є спільним для вхідного і вихідного кіл, транзистори у схемах можуть вмикатись трьома способами: за схемою зі спільною базою (СБ), за схемою зі спільним емітером (СЕ) та за схемою зі спільним колектором (СК), рис. 8.2.

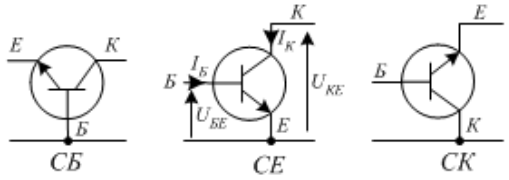


Рис. 8.2

В подальшому будемо розглядати основну схему вмикання транзистора, а саме схему зі спільним емітером.

Статичні характеристики транзистора. Транзистор, ввімкнений за будь-якою схемою (СК, СБ, СЕ) характеризується такими фізичними величинами: вхідна і вихідна напруга та вхідний і вихідний струм. Взаємозв'язок між цими величинами визначають сімейство вхідних і вихідних статичних вольт-амперних характеристик транзистора.

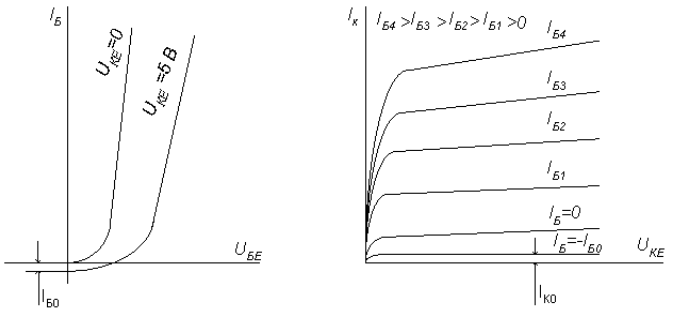
Для схеми увімкнення зі спільним емітером вхідна характеристика транзистора – це залежність струму бази $I_Б$ від напруги база-емітер $U_{БЕ}$, за умови що напруга між колектором і емітером незмінна ($U_{КЕ} = const$), тобто

$$I_Б = f(U_{БЕ})|_{U_{КЕ}=const}.$$

Сімейства вихідних характеристик транзистора − це залежність струму колектора $I_к$ від напруги колектор-емітер $U_{КЕ}$, за умови що струм бази незмінний ($I_Б = const$)

$$I_К = \varphi(U_{КЕ})|_{I_Б=const}.$$

Сімейства вхідних статичних характеристик наведені на рис. 8.3, а.



а) б)

Рис. 8.3

У разі коли $U_{KE}=0$ вхідна характеристика відповідає прямій гілці вольт-амперної характеристики двох паралельно з'єднаних *p-n* переходів (емітерного і колекторного).

За $U_{KE} \neq 0$ струм бази зменшується (характеристика зміщується до низу), що пояснюється зменшенням кількості рекомбінацій основних носіїв заряду в області бази.

Вихідні характеристики транзистора у схемі зі СЕ (рис. 8.3, б) починаються з початку координат.

У разі, коли $U_{KE} = 0$ на колекторному переході є напруга $U_{БЕ}$, яка зміщує його в прямому напрямку. З області колектора інжектуються основні заряди у базу, що компенсує потік основних носіїв заряду з емітера в колектор, тобто взаємно врівноважується потік носіїв через колекторний перехід і $I_K = 0$.

При підвищенні напруги U_{KE} пряма напруга на колекторному переході спочатку знижується, зменшується інжекція основних носіїв заряду через колекторний перехід і відповідно збільшується колекторний струм.

При збільшенні U_{KE} до величини $(0{,}5 \div 1{,}5)B$ колекторний перехід зміщується у зворотному напрямку і подальше збільшення колекторного струму відбувається в за рахунок модуляції бази зворотно зміщеним колекторним переходом. В разі збільшення базового струму характеристики будуть зміщуватись в бік збільшення колекторного струму, тому що

$$I_K = \beta I_Б + I_{K0}.$$

Динамічний режим роботи транзистора. У динамічному режимі роботи транзистора одночасно змінюються вхідна і вихідна напруги та його вхідний і вихідний струми.

Так, для схеми зі СЕ, вхідний (базовий) струм залежить від вхідної і вихідної напруг одночасно, тобто динамічна вхідна характеристика описується рівнянням

$$I_Б = f(U_{БЕ})|_{U_{KE}=var}.$$

Аналогічно вихідна динамічна характеристика описується рівнянням

$$I_K = \varphi(U_{KE})|_{I_Б=var}.$$

Динамічний режим має місце при вмиканні в колекторне коло резистора R_K (рис. 8.4).

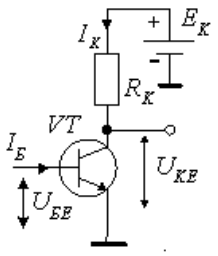


Рис. 8.4

Відповідно до другого закону Кірхгофа, маємо

$$E_K = U_{KE} + I_K R_K.$$

Пряма лінія, що описується цим рівнянням, називається навантажуючою прямою або вихідною динамічною характеристикою. На сімействі вихідних статичних характеристик транзистора навантажувальна пряма будується за двома точками (рис. 8.5):

$$U_{KE} = E_K \text{ (якщо } I_K = 0) \text{ і } I_K = E_K/R_K \text{ (якщо } U_{KE} = 0).$$

Навантажувальна лінія і сімейство статичних характеристик транзистора визначають залежність колекторного струму від струму бази і напруги на колекторі за постійною величиною ЕРС джерела живлення і незмінному опорі R_K. Режим роботи транзистора визначається точкою перетину навантажувальної лінії і статичних характеристик з відповідним базовим струмом.

Ця точка перетину називається робочою точкою. І в залежності від її положення розрізняють три характерні області на динамічній характеристиці або три режими роботи транзистора.

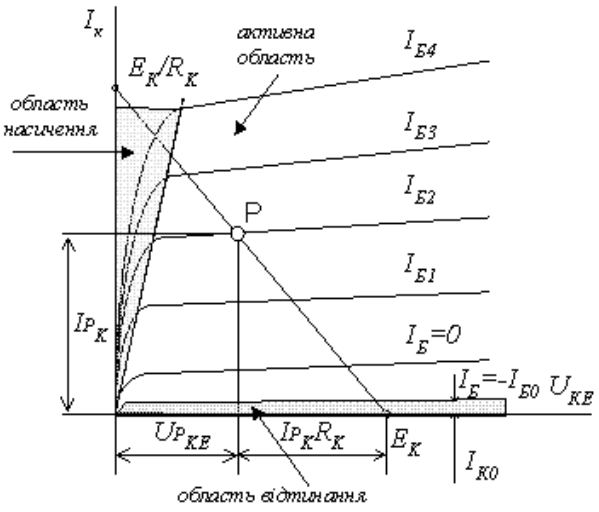


Рис. 8.5

Активний режим (робоча точка знаходиться в активній області), у якому емітерний ***p-n*** перехід транзистора зміщений у прямому напрямі, а колекторний ***p-n*** перехід у зворотному.

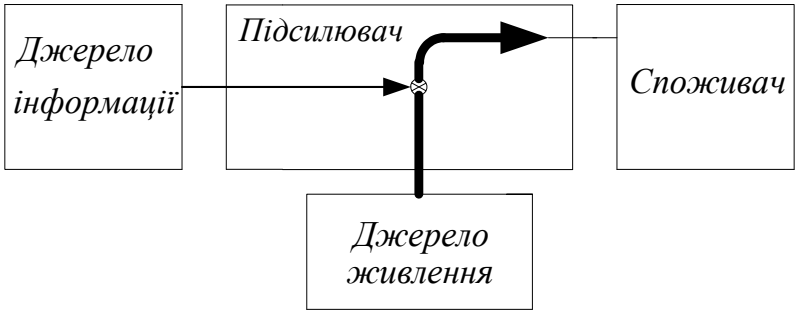
В такому режимі транзистор працює у схемах підсилювачів електричних сигналів.

Режим насичення (робоча точка знаходиться в області насичення), у якому обидва ***p-n*** переходи транзистора зміщені у прямому напрямі.

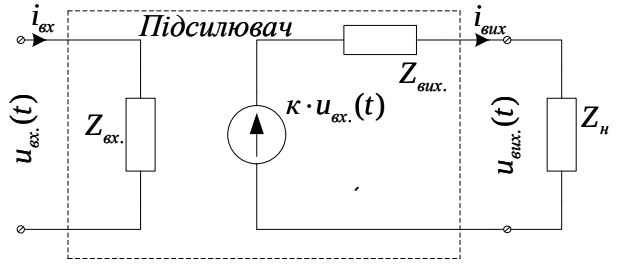
Режим відтинання (робоча точка знаходиться в області відтинання), у якому обидва ***p-n*** переходи зміщені у зворотному напрямі

У режимах насичення і відтинання транзистор не має підсилення. Ці режими використовуються при роботі транзисторів в імпульсних схемах.

Підсилювачі електричних сигналів. Підсилювачем називається електронний пристрій, призначений для підсилення інформативного параметра сигналу. Структура підсилювача наведена на рис. 8.6, а.



а)



б)

Рис. 8.6

З точки зору теорії електричних кіл підсилювач - це активний чотириполюсник, що має два вхідних і два вихідний затискача (полюса) і характеризується вхідним $Z_{вх}$ і вихідним $Z_{вих}$ опорами (імпедансами). До вхідних затискачів приєднується джерело вхідного сигналу, а до вихідних навантаження з опором $Z_н$, рис. 8.6, б.

Процес підсилення вхідного сигналу здійснюється шляхом зміни опору транзистора, ввімкненого в коло джерела живлення і, таким чином, керуванню потоком енергії від джерела живлення до споживача під дією інформативного сигналу. Підсилююча властивість такого чотириполюсника врахована керованим ідеальним джерелом напруги

$$u_{вих}(t) = k u_{вх}(t).$$

Властивості підсилювача визначає сукупність його наступних основних технічних показників: коефіцієнти підсилення (по напрузі, струму, потужності), вхідний і вихідний опори, вихідна потужність, коефіцієнт корисної дії, чутливість, діапазон підсилюючих частот, а також показники характеризуючи нелінійні, частотні та фазові спотворення підсилюючого сигналу.

Підсилювач з фіксованим струмом бази. Щоб зрозуміти принцип дії підсилювача, потрібно добре усвідомити крім динамічного режиму транзистора його статичний режим, або режим спокою. В цьому режимі струм колектора транзистора $I_{РК}$, напруга між колектором і емітером $U_{РКЕ}$, а також відповідні їм

струм бази $I_{РБ}$ та напруга між базою і емітером $U_{РБЕ}$ є незмінними. Вони визначаються місцем знаходження робочої точки P на навантажувальній прямій.

Найпростіша схема, що забезпечить такий режим транзистора VT типу ***n−p−n,*** показана на рис. 8.7.

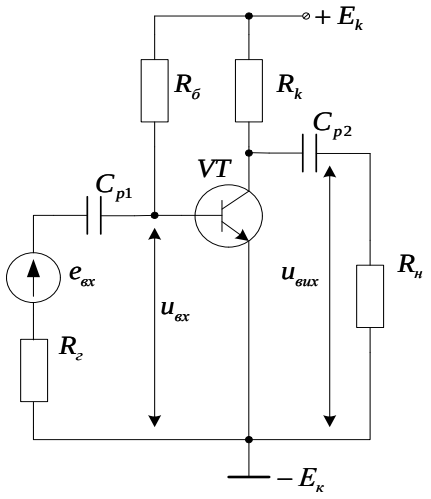


Рис. 8.7

Її називають схемою з фіксованим струмом бази.

Резистор $R_б$, ввімкнений в коло бази транзистора ($+E_к$, $R_б$, ділянка база - емітер транзистора, $-E_к$), забезпечує потрібне значення струму бази $I_{РБ}$ і напруги між базою та емітером $U_{РБЕ}$, тобто опори резистора $R_б$ і ділянки $ЕБ$ транзистора є дільником напруги джерела живлення $E_к$. Значення опору резистора $R_б$ визначається за виразом [7,8]:

$$R_б = \frac{E_к - U_{РБЕ}}{I_{РБ}}.$$

Зміни в схемі, а в більшості випадків це напруги між базою та емітером транзистора приводять до зміни струму бази і, як результат, до переміщення робочої точки P по навантажувальній прямій і, як результат, зміни струму колектора та напруги між колектором і емітером від початкових значень.

Подібні зміни в схемі підсилювача викликаються зміною напруги вхідних сигналів, які потребують підсилення.

Конденсатор $C_{р1}$ служить для приєднання джерела вхідного сигналу з ЕРС $e_{вх}$ і внутрішнім опором $R_г$ в коло бази транзистора. Його називають роз'єднуючим постійної і змінної (інформативної) складових вхідного сигналу. З іншої сторони, якщо він буде відсутній, то в колі джерела вхідного сигналу створиться постійний струм від джерела живлення $E_к$, який змінить режим роботи джерела вхідного сигналу, наприклад викличе його нагрівання. Конденсатор $C_{р2}$ на виході підсилювача забезпечує виділення із напруги між колектором і емітером підсиленої змінної (інформативної) складової, що подається в пристрій навантаження з опором $R_н$.

Усвідомити роботу підсилювача допоможе його графічний аналіз, рис. 8.8.

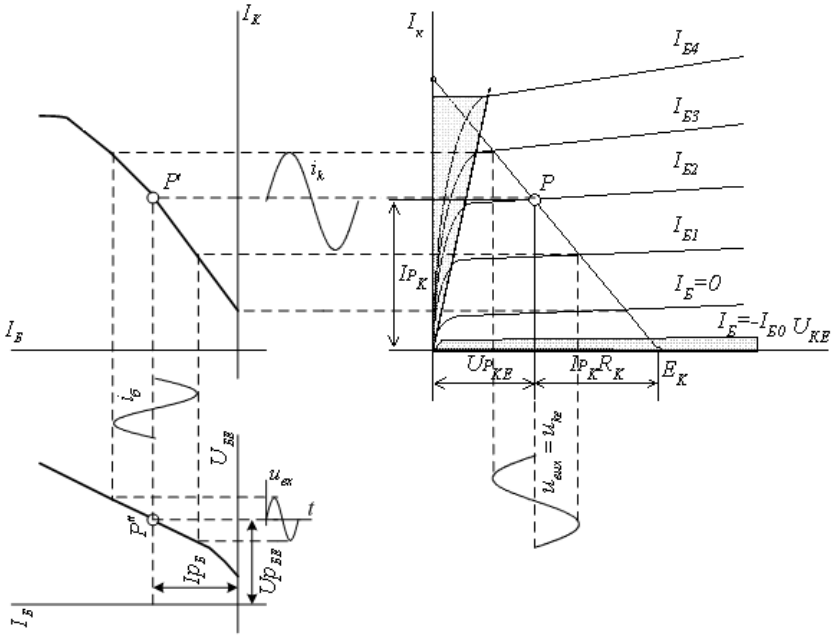


Рис. 8.8

Його зручно проводити, якщо побудувати по точкам перетину лінії навантаження з вихідними характеристиками, відповідними до різних струмів бази, перехідну характеристику

$$I_K = f(I_Б)$$

і вхідну динамічну

$$I_Б = f(U_{БЕ}).$$

За вхідну динамічну характеристику за звичай використовують вхідну статичну характеристику, що відповідає напрузі на колекторі $U_{КЕ} \neq 0$.

Вхідний сигнал підсилювача з напругою $u_{вх}$ викликає зміну напруги між базою та емітером і, як наслідок, зміну струму бази відповідно до вхідної характеристики, тобто в струмі бази крім постійної складової $Ip_Б$, з'являється змінна складова $i_б$. Одночасно з цим будуть змінюватись струм колектора $i_к$, спад напруги на резисторі R_k і, як результат, напруга між колектором і емітером, тобто в струмі колектора і в напрузі між колектором і емітером крім постійних складових, з'являться змінні (інформаційні) складові.

Змінна складова напруги між колектором і емітером, що дорівнює змінній складовій спаду напруги на резисторі R_k і зворотна за фазою становить вихідну напругу підсилювача,

$$U_{вих} = - R_к i_к.$$

Для напруги вхідного сигналу справедливо співвідношення

$$u_{вх} = R_{вх} \cdot i_{вх} \ ,$$

де $R_{вх}$ – вхідний опір підсилюючого каскаду, приблизно дорівнює вхідному опору транзистора, а вхідний струм підсилювача струму бази,

$$i_{вх} \approx i_б.$$

Оскільки

$$i_к > i_б \ , R_к > R_{вх},$$

то коефіцієнт підсилення по напрузі має вигляд

$$K_u = u_{вих} / u_{вх} >> 1 \ .$$

Якщо діапазон зміни напруги вхідного сигналу укладається в лінійні ділянки вхідних і вихідних характеристик транзистора, то форма вихідної напруги підсилювача буде повторювати форму вхідної.

Підсилювач з фіксованою напругою бази. Схема каскаду підсилювача з фіксованим струмом бази відзначається простотою забезпечення початкового стану робочої точки за допомогою єдиного джерела живлення $E_к$. Однак такий спосіб забезпечення початкового місця робочої точки P на навантажувальній прямій придатний тільки за малих коливань температури транзистора (від температури залежить опір ділянки база - емітер транзистора VT).

Більш ефективною являється схема каскаду підсилення з фіксованою напругою бази, рис. 8.9.

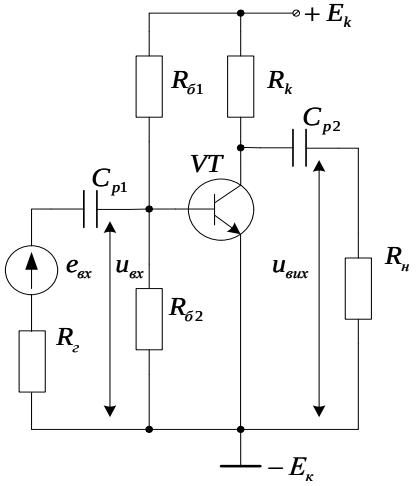


Рис. 8.9

В цій схемі резистори $R_{б1}$ і $R_{б2}$, приєднані паралельно джерелу живлення $E_к$, складають дільник напруги.

Опір дільника визначається із очевидних співвідношень [7,8]:

$$R_{б1} = \frac{E_k - U_{РБЕ}}{I_д + I_{РБ}}, \quad R_{б2} = \frac{U_{РБЕ}}{I_д},$$

де $I_д$ – струм дільника за звичай вибирають в межах (2÷5) $I_{РБ}$.

В цьому випадку збільшується стабільність роботи підсилювача, оскільки зміна струмів в колах транзистора за різних причин мало впливає на величину $U_{РБЕ}$, що визначає початкове місце робочої точки P на навантажувальній прямій, тобто

$$U_{РБЕ} = R_{б2} I_д.$$

Основний дестабілізуючий фактор, що порушує сталість роботи транзисторного підсилювача являється залежність параметрів транзистора від температури.

З її підвищенням збільшується колекторний струм за рахунок збільшення кількості неосновних носіїв заряду в напівпровідниковій структурі транзистора.

Це приводить до зміщення робочої точки з її початкового стану.

Тому побудова схем транзисторних підсилювачів вимагає приймати заходи для термостабілізації початкового місця робочої точки P на навантажувальній прямій.

Для цього в коло емітера вмикають резистор R_E і конденсатор C_E, рис. 8.10.

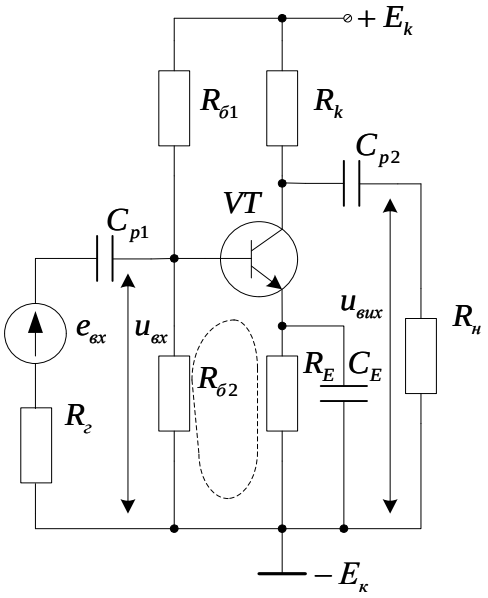


Рис. 8.10

Як результат назустріч напрузі $U_{РБЕ}$, що визначає початковий стан робочої точки і є спадом напруги на резисторі $R_{б2}$ ввімкнена напруга, що є спадом напруги на резисторі R_E, тобто

$$U_{РБЕ} = R_{б2} I_д - R_E I_E.$$

В разі збільшення температури, постійна складова колекторного струму збільшиться.

Так як

$$I_{PE}=I_{PK}+I_{PБ},$$

то збільшення струму I_{PK} приведе до збільшення струму емітера I_{PE} і, як наслідок, спаду напруги на резисторі R_E. В результаті напруга між базою і емітером $U_{PБE}$ зменшиться, що приведе до зменшення струму бази $I_{PБ}$ і, як наслідок, зменшенню струмів колектора I_{PK} і емітера I_{PE}.

Введення в коло емітера тільки резистора R_E і відсутності конденсатора C_E змінить роботу підсилюючого каскаду не тільки в режимі спокою, а також за наявністю вхідного сигналу. Тому для термостабілізації робочої точки тільки по постійній складовій струму емітера, паралельно резистору R_E включають конденсатор C_E такої величини, щоб його опір для нижньої граничної частоти $f_н$ підсилюючих сигналів був набагато менший за R_E.

Частотні характеристики підсилювача. Для оцінки коефіцієнта підсилення підсилювача на різних частотах підсилюючих сигналів користуються амплітудно-частотними та фазочастотними характеристиками, рис. 8.11.

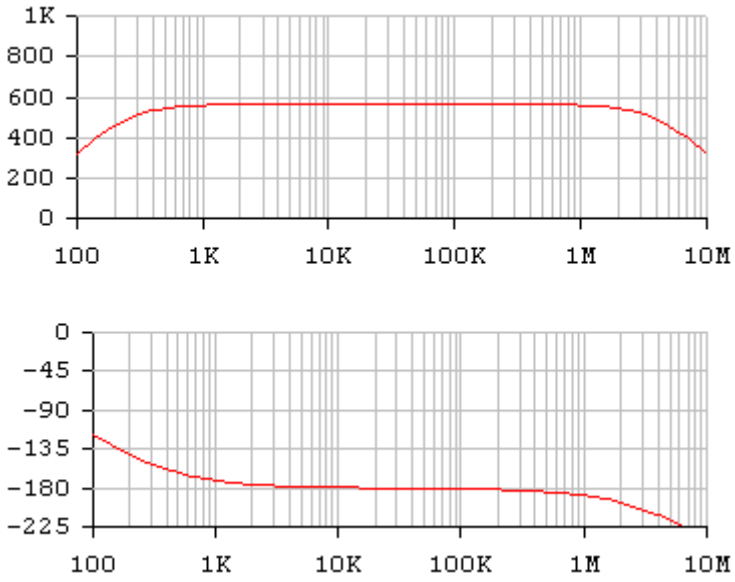


Рис. 8.11

На рис 8.11 за віссю абсцис застосована шкала десяткових логарифмів і тоді значення частоти виражаються у десяткових логарифмічних одиницях частоти – декадах (дк).

За віссю ординат застосована лінійна шкала. Зменшення коефіцієнта підсилення та відхилення кута зсуву фази вихідного сигналу по відношенню до його значення 180^0 в області нижніх і верхніх частотах називають частотними спотвореннями. Причиною цих спотворень є наявність в схемі підсилювача реактивних елементів: котушок індуктивності, конденсаторів, між електродних ємностей елементів підсилювача, ємностей монтажу та інше. А назва, частотні спотворення, обумовлена тим, що гармоніки складного сигналу,

проходячи через підсилювач, матимуть неоднаковий зсув по фазі і форма вихідного сигналу спотворюється.

Частотні спотворення характеризується коефіцієнтом частотних спотворень, який визначається відношенням коефіцієнта підсилення на даній частоті K_f: до коефіцієнта підсилення на середній частоті $K_{ср}$,

$$M = K_f / K_{ср}.$$

Часто допустиме значення коефіцієнта частотних спотворень приймають рівним

$$M = K_f / K_{ср} = 1/\sqrt{2} = 0{,}707.$$

Частоти $f_н$ та $f_в$, на яких коефіцієнт частотних спотворень дорівнює допустимому, називаються граничними частотами, а діапазон частот, у якому коефіцієнт частотних спотворень не перевищує допустимих значень, тобто

$$\Delta f = f_в - f_н$$

називають смугою пропускання підсилювача.

Зворотні зв'язки в підсилювачах. Зворотним зв'язком (*ЗЗ*) називається передача енергії вихідного сигналу або його частини на вхід підсилювача.. Пристрій, за допомогою якого передається вихідний сигнал підсилювача на його вхід називають ланкою зворотного зв'язку.

Зворотні зв'язки в підсилювачах за звичай створюють спеціально. Проте інколи вони виникають за рахунок паразитних ємностей, внутрішніх опорів джерел живлення і інше. Такі зворотні зв'язки називають паразитними.

Зворотний зв'язок називається додатним, якщо частина вихідного сигналу додається до вхідного сигналу підсилювача, якщо ж частина вихідного сигналу віднімається від вхідного, то зворотній зв'язок називається від'ємним.

За способом увімкнення зворотного зв'язку на вході підсилювача розрізняють послідовний і паралельний зворотний зв'язок. Якщо джерело вхідного сигналу і вихід ланки зворотного зв'язку ввімкнені послідовно, то такий зворотний зв'язок називають послідовним, а якщо паралельно, то паралельним.

Найбільш поширене використання має підсилювач з послідовним від'ємним зворотним зв'язком за напругою, рис. 8.12.

Рис. 8.12

Визначимо коефіцієнт підсилення підсилювача з таким зворотнім зв’язком, використовуючи наступні співвідношення [7,8]:

$$U_{вих} = KU'_{вх}, \;\; U_{вих} = K_{\beta}U_{вх}, \;\; U'_{вх} = U_{вх} \pm U_{зз}, \;\; U_{зз} = \beta U_{вих},$$

тоді

$$K_{\beta} = \frac{K}{1-(\pm\beta K)},$$

де $\pm\ \beta\ k$ називають фактором зворотного зв’язку; знак “+” відповідає додатному зворотному зв’язку, а знак “–” від’ємному.

Аналіз виразу коефіцієнта підсилення підсилювача з зворотнім зв’язком показує, що від’ємний зворотний зв’язок зменшує коефіцієнт підсилення в *(1+Kβ)* раз. Незважаючи на це від’ємний зворотний зв’язок використовують для покращення параметрів і характеристик підсилювача.

Додатний зворотний зв’язок навпаки, збільшує коефіцієнт підсилення. Це приводить до нестійкої роботи підсилювача, тому вона використовується для побудови електронних генераторів електричних коливань. Їх функціональна схема складається з підсилювача з коефіцієнтом підсилення $\dot{K}$ і кола додатного зворотного зв’язку з коефіцієнтом передачі зворотного зв’язку $\dot{\beta}$, рис. 8.13.

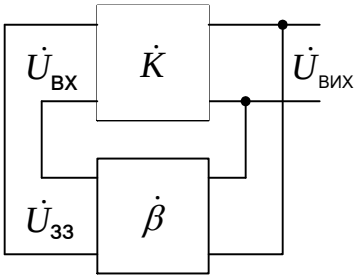


Рис. 8.13

Список питань для самоконтролю

1. Надати визначення біполярного транзистора. Які існують схеми вмикання транзисторів?
2. Принципи дії підсилювача з фіксованим струмом бази.
3. Який зворотній зв'язок у підсилювачі називається додатним?
4. Надати визначення послідовного зворотнього зв'язку у підсилювачі.
5. Надати визначення паралельного зворотнього зв'язку у підсилювачі.

Тема 4.3. Дискретні електронні пристрої

Лекція 8. Диференційні каскади. Операційні підсилювачі. Інвертуючий підсилювач. Інвертуючий суматор. Загальна характеристика імпульсних пристроїв. Параметри імпульсних сигналів. Параметри послідовності імпульсів. Діодні ключі. Робота біполярного транзистора в ключовому режимі. Логічні елементи. Імпульсний режим роботи операційних підсилювачів.

Операційні підсилювачі (ОП). Принципова схема ОП надзвичайно складна. Виготовляються вони у вигляді інтегральних мікросхем, мають два входи (прямий іі нверсний) і один вихід. Характеризуються значним коефіцієнтом підсилення за напругою (прийнято вважати $K_u \to \infty$), великим вхідним ($R_{вх} \to \infty$) і малим вихідним ($R_{вих} \to 0$) опорами. Вони були призначені тільки для виконання математичних операцій над сигналами. Звідси і походить їх назва. На сучасному етапі розвитку електроніки операційний підсилювач став універсальним базовим елементом і входить до складу більшості електронних пристроїв. Умовні позначення операційного підсилювача на електричних схемах наведені на рис. 9.1.

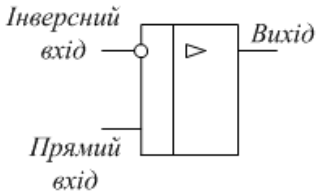


Рис. 9.1

Якщо на прямий вхід подати сигнал, то вихідний сигнал операційного підсилювача матиме ту саму полярність, якщо сигнал постійний і ту саму фазу, якщо сигнал синусоїдний. Вихідний сигнал має протилежну полярність для постійного характеру сигналу і фазу зсунуту на 180˚ для синусоїдного, якщо сигнал подати на інверсний вхід.

До основних параметрів операційного підсилювача відносять: K_u- коефіцієнт підсилення за напругою; K_p-коефіцієнт підсилення за потужністю; $U_{вих.макс}$- максимальне значення вихідної напруги; $f_н$- нижня гранична частота сигналу, що підсилюється; $R_{вх}$- вхідний опір; $R_{вих}$- вихідний опір.

Важливою для ОП є передаточна характеристика $u_{вих} = f(u_{вх})$,

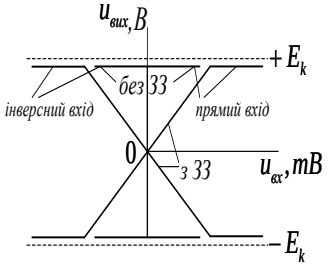


Рис. 9.2

Оскільки підсилювач має два входи (прямий і інверсний), то ця характеристика відображає роботу ОП при поданні сигналу на кожний вхід окремо за умови без і з наявністю зворотного зв'язку. Величина вихідного сигналу на виході підсилювача обмежується максимальною напругою $U_{вих.макс}$ додатного чи від'ємного значення, яка досягає (0.9 ÷ 0.95) напруги живлення $E_к$.

На цих ділянках зміна вхідного сигналу не буде викликати зміни вихідного сигналу, тобто напруга на виході буде залишатись сталою.

На похилих ділянках характеристики величина вихідної напруги буде визначатися коефіцієнтом підсилення

$$K_u = \frac{\Delta u_{вих}}{\Delta u_{вх}}.$$

У випадку наявності сигналів на обох входах ОП, його вхідна напруга визначатиметься алгебраїчною сумою напруг на цих входах

$$\Delta u_{вх} = \Delta u_{вх2} - \Delta u_{вх1}.$$

ОП мають рівномірну амплітудно − частотну характеристику аж до конче низьких частот, рис. 9.3.

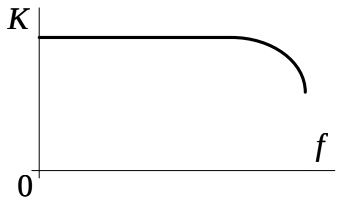


Рис. 9.3

Враховуючи це, ОП використовуються в якості підсилювачів постійного струму. Розглянемо, як приклад, інверсне включення операційного підсилювача, рис. 9.4.

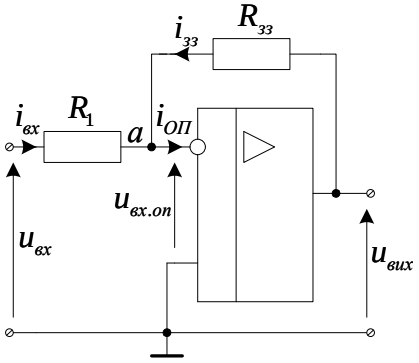


Рис. 9.4

В схемах таких підсилювачів вхідна напруга $u_{вх}$ подається на інверсний вхід, а вихідна напруга $u_{вих}$ змінюється в проти фазі до вхідної (у випадку синусоїдального сигналу його фаза змінюється на 180^0).

Від'ємний зворотний зв'язок реалізується через резистори $R_{зз}$ на інверсний вхід ОП. Наявність такого зв'язку призводить до того, що завжди у стані рівноваги

$$u_{вх\ оп} \approx 0.$$

Це можна довести тим, що за будь-якого значення вихідної напруги напруга

$$u_{вх\ оп} = u_{вих}/к,$$

де $к$ – коефіцієнт підсилення підсилювача.

Якщо $к \to \infty$, то

$$u_{вх\ оп} \to 0.$$

Звернемо увагу на те, що близькість потенціалу точки **а** до нуля (точку ще називають віртуальним нулем) зовсім не означає, що її можна з'єднати із спільною точкою підсилювача, оскільки такий малий потенціал входу ОП є результат дії від'ємного зворотного зв'язку і значного коефіцієнта підсилення підсилювача без від'ємного зворотного зв'язку.

За другим законом Кірхгофа маємо

$$u_{вх} - u_{вх.оп} = R_1 i_{вх}, \quad u_{вих} - u_{вх.оп} = R_{зз} i_{зз}, \quad i_{вх} = \frac{u_{вх}}{R_1}, \quad i_{зз} = \frac{u_{вих}}{R_{зз}}.$$

Враховуючи, що

$$R_{вх оп} = \infty, \text{ то } i_{ОП} = 0$$

і відповідно

$$i_{вх} = -i_{зз},$$

Тобто

$$\frac{u_{вх}}{R_1} = -\frac{u_{вих}}{R_{зз}}.$$

Звідси отримаємо, що для такого підсилювача коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_u = \frac{u_{вих}}{u_{вх}} = -\frac{R_{зз}}{R_1} = -\frac{1}{\beta},$$

де $\beta = \frac{R_1}{R_{зз}}$ - коефіцієнт передачі ланки зворотного зв'язку ОП.

Підсилювач в даному випадку виконує функцію масштабного операційного блоку.

Потрібно відзначити, що значення опорів резисторів R_1 і $R_{зз}$ обмежуються відповідно величиною вхідного і вихідного струмів ОП і їх значення часто визначаються на підприємстві де виготовляють ОП.

Імпульсні пристрої В попередніх лекціях розглядались пристрої безперервного режиму роботи, тобто тривалої безперервної дії в них інформаційних сигналів. Нарівні з таким режимом роботи електронних пристроїв, часто використовується імпульсний режим роботи, тобто короткочасна дія сигналу змінюється паузою.

Такий режим роботи електронних пристроїв характеризується:

- значною потужністю сигналу порівняно з потужністю пристрою;
- зменшенням температурного впливу на режим роботи;
- збільшенням пропускної спроможності та підвищенням завадостійкості;
- збільшенням достовірності сигналів та надійності роботи.

У імпульсних пристроях використовуються різні за формою імпульси: прямокутні, трапецеподібні, пилоподібні, експоненційні тощо, рис. 9.5.

Рис. 9.5

На загал імпульсні сигнали є періодичними з періодом T, якому відповідає частота повторюваності $f=1/T$, рис. 9.6.

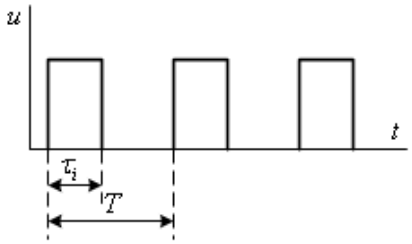


Рис. 9.6

Важливою величиною є шпаруватість імпульсів

$$q=T/\tau_i,$$

яка вказує на тривалість імпульсу в межах періоду.

До складу електронних імпульсних пристроїв входять електронні ключі, основою яких є напівпровідникові діоди, тиристори, польові або біполярні транзистори, що працюють в ключових режимах.

Ключовий режим характеризується двома станами ключа:

«Включено» - «Виключено».

На рис. 9.7 показана спрощена схема ідеального ключа.

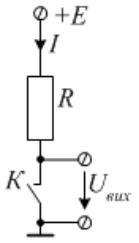


Рис. 9.7

Стану ключа „Виключено" відповідають значення струму

$$I = 0$$

і вихідної напруги

$$U_{вих}=E,$$

а стану „Включено"

$$I=E/R \text{ і } U_{вих}=0.$$

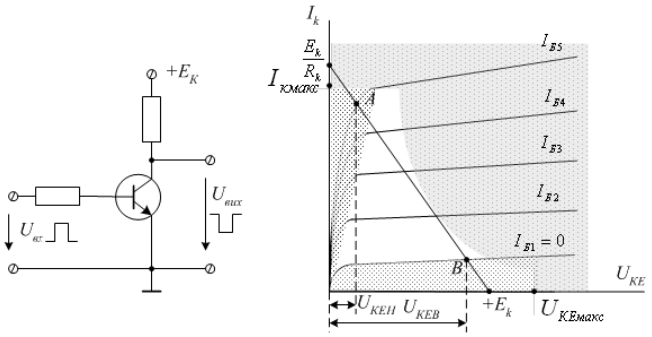
При цьому мається на увазі, що опір розімкненого ключа нескінченно великий, а замкненого дорівнює нулю.

В реальних ключах струми та рівні вихідної напруги відповідно до стану ключа залежать від типу і параметрів напівпровідникового приладу, що працює в режимі ключа, а перехід із одного стану в інший відбувається не миттєво, а в часі зумовленому інерційністю приладу та наявністю паразитних ємностей і індуктивностей в його колі.

Таким чином якість ключа визначається струмом ключа в його розімкненому стані, спадом напруги на ключі в його замкненому стані, часом переходу ключа із одного стану в інший (часом перемикання).

Перерахованими чинниками визначається вибір того чи іншого типу електронного ключа.

Найпоширеніша схема транзисторного електронного ключа зображена на рис. 9.8, а у якій транзистор *VT* типу ***n–p–n*** увімкнений за схемою із спільним емітером.



а) б)

Рис. 9.8

Схема ключа мало відрізняється від схеми підсилювача, виконаного за схемою із спільним емітером.

На відміну від розглянутих раніше режимів, де транзистор працював в режимах малого сигналу і вважався лінійним елементом, в імпульсному режимі транзистор працює в режимі великого сигналу і визначається двома станами: відсіку (транзистор закритий – точка В) та насичення (транзистор відкритий – точка **А**), рис. 9.8, б.

Часові діаграми, що пояснюють роботу ключа зображені на рис. 9.9.

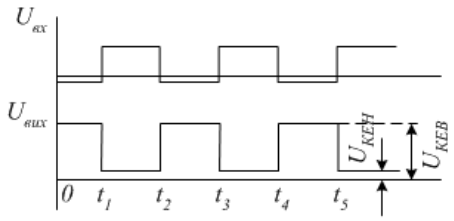


Рис. 9.9

Для реалізації стану відсіку потрібно забезпечити умову

$$U_{вх} = U_{БЕ} < 0.$$

На часових діаграмах стан відсіку відповідає інтервалам часу:

$$t_1 < t > 0;\ t_3 < t > t_2;\ t_5 < t > t_4.$$

При цьому

$$U_{вх} < 0,\ U_{вих} = U_{КЕВ} \approx +E_к,$$

де $+E_к$ – напруга живлення джерела.

Стан насичення забезпечується за умови, що струм насичення бази

$$I_{БН} = SI_{Б5},$$

де S – коефіцієнт насичення (рекомендоване значення $S \approx 1.5 \div 2$).

На рис. 9.9 цьому стану відповідають часові інтервали

$$t_2 < t > t_1; t_4 < t > t_3; t > t_5.$$

Цей режим характеризується напругою

$$U_{вх} > 0, U_{вих} = U_{КЕ} = U_{КЕН} \approx 0.$$

Логічні елементи. Логічні елементи широко використовуються в цифрових електронних пристроях і відносяться до елементів імпульсної техніки. Вони виконують логічні операції у відповідності до математичного апарату, що має назву його розробника, ірландського математика Буля.

Ця математична система оперує двома поняттями: подія істинна і подія не істинна, що в цифровій формі можна інтерпретувати цифровими знаками двійкової системи числення відповідно:

$$x = 1, \text{ якщо } x \neq 0 \text{ і } x = 0, \text{ якщо } x \neq 1.$$

Тобто на відміну від змінної в звичайній алгебрі логічна змінна має тільки два значення, котрі зазвичай називаються логічним нулем і логічною одиницею.

Позначаються логічні величини «1» і «0». Різні логічні змінні можуть бути зв'язані функціональними залежностями.

Наприклад, вираз

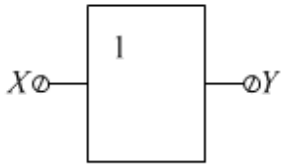
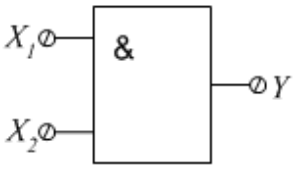
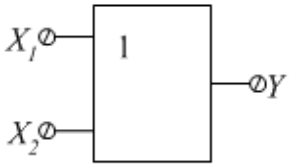
$$y = f(x_1, x_2)$$

вказує на функціональну залежність логічної змінної y від логічних змінних x_1 і x_2, які називаються аргументами (або вхідними змінними). Який би складний не був логічний зв'язок поміж логічною функцією та її аргументами, його завжди можна представити набором елементарних логічних операцій.

Основними логічними операціями є заперечення (операція **НЕ**, інверсія), диз'юнкція (операція **АБО** (OR), логічне додавання) і кон'юнкція (операція **І** (AND), логічне множення).

Назви, умовні графічні позначення, таблиці істинності та логічні рівняння перелічених логічних функцій наведені в таблиці 9.1.

Табл. 9.1.

Логічна функція	Таблиця істинності	Схемне зображення
Логічне заперечення $Y = \overline{X}$	X | Y 0 | 1 1 | 0	
Логічне множення $Y = X_1 \wedge X_2$ або $Y = X_1 \cdot X_2$	X_1 | X_2 | Y 0 | 0 | 0 0 | 1 | 0 1 | 0 | 0 1 | 1 | 1	
Логічне додавання $Y = X_1 \vee X_2$ або $Y = X_1 + X_2$	X_1 | X_2 | Y 0 | 0 | 0 0 | 1 | 1 1 | 0 | 1 1 | 1 | 1	

Запереченням **(**інверсією, операцією **НЕ**) називається такий зв'язок між вхідною логічною змінною *X* і вихідною логічною змінною *Y*, при якому *Y* правдиве тільки тоді, коли *X* хибне, і, навпаки, *Y* хибне тоді, коли *X* правдиве. За допомогою логіко-математичної символіки логічна функція *Y* записується як

$$Y = \overline{X}$$

і читається "*Y* не є *X*".

Логічним додаванням **(**диз'юнкцією, операцією **АБО**) декількох змінних називається така функція, яка хибна тільки тоді, коли одночасно хибні усі аргументи (доданки, вхідні змінні).

Операція логічного додавання позначається знаком + або символом $\vee$. Наприклад, операція АБО між двома змінними X_1 і X_2 записується

$Y=X_1 \vee X_2$ або X_1+X_2 і читається: "*Y* є X_1 або X_2".

Логічне множення **(**кон'юнкція, операція **І)** декількох змінних називається така функція, яка справедлива тільки тоді, коли одночасно справедливі усі вхідні змінні (аргументи).

Операція логічного множення (**І**) позначається знаком математичного множення, тобто крапкою, яку можна не писати, або символом $\wedge$.

Наприклад, операція **І** між двома змінними X_1 і X_2 записується

$$Y=X_1 \wedge X_2 \text{ або } Y=X_1 \cdot X_2=X_1X_2$$

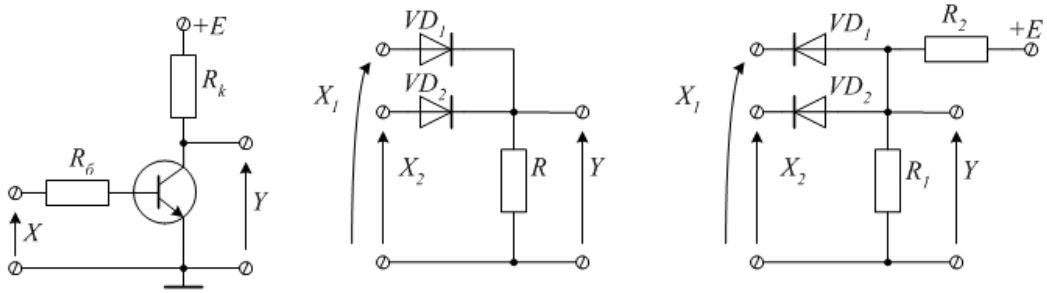
і читається:

“Y є X_1 і X_2”.

Ці логічні функції реалізуються відповідними логічними елементами з аналогічними назвами. Вони переважно складаються з електронних перемикачів, а за способом кодування двійкових змінних зазвичай поділяються на імпульсні і потенційні.

В імпульсних елементах «1» показує наявність електричного імпульсу напруги або струму, а «0» – відсутність відповідного імпульсу.

У потенційних логічних елементах двійкові змінні кодуються різною величиною електричного потенціалу. Наведемо найпростіші схеми реалізації логічних елементів. Логічний елемент НЕ виконано з використанням транзисторного ключа, рис. 9.10, а.



а) б) в)

Рис. 9.10

Величина напруги живлення $+E$ має значення, що відповідає логічній одиниці. Якщо сигнал на вході транзистора X за величиною дорівнює логічній одиниці, то транзистор відкритий і вихідний сигнал Y за величиною напруги відповідає логічному нулю. *І*, навпаки, якщо на вході транзистора сигнал дорівнює логічному нулю, то транзистор закритий і напруга вихідного сигналу Y близька до $+E$, що відповідає логічній одиниці. Таким чином величина на виході завжди буде протилежною до логічної величини на вході. Логічний елемент АБО реалізовано за схемою з напівпровідниковими діодами VD_1 і VD_2, рис. 9.10, б.

Напруга на виході такої схеми дорівнюватиме логічній одиниці, якщо хоча б на один із входів подано додатну напругу («+» до анода діода), величина якої дорівнює логічній одиниці. Логічний елемент І теж реалізовано схемою з використанням діодів за умови, що $R_1 > R_2$, рис. 9.10, в.

Напруга на виході такої схеми дорівнюватиме логічній одиниці тільки тоді, коли обидва діоди будуть закриті, тобто на обидва входи буде подано сигнали, що відповідають логічній одиниці. На рис. 9.11 наведені найпростіші схеми логічних елементів виконаних на транзисторах та їх часові діаграми.

Аналізуючи за часовими діаграмами можливі набори вхідних змінних *X1, X2* і відповідні їм значення функції *Y*, можна легко зрозуміти принцип роботи кожної схеми.

На практиці рідко використовуються логічні елементи, що реалізують тільки одну логічну операцію.

В основному логічні елементи реалізують складні логічні функції. Найбільш поширеними схемами складних базових логічних елементів подані на рис. 9.11 логічні елементи **І-НЕ** та **АБО-НЕ**.

Вони являються універсальними, тому що використовуючи їх, можна виконувати будь - яку із трьох логічних операцій.

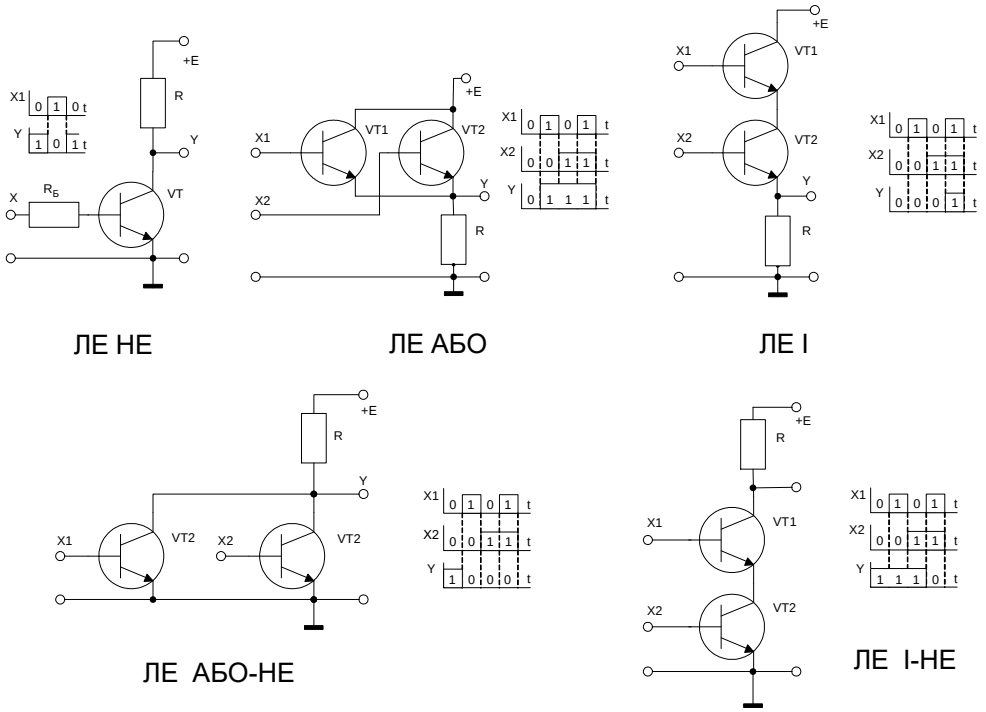


Рис. 9.11

Тригери. Відомо [7,8], що тригери – пристрої, які характеризуються двома стійкими станами рівноваги, а стрибкоподібний перехід із одного стану в інший здійснюється за наявності зовнішнього керуючого імпульсу (сигналу) $U_{кер}$, рис. 9.12.

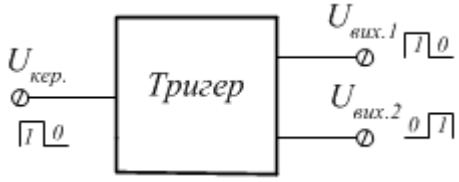


Рис. 9.12

Зазвичай схеми тригерів реалізуються з використанням біполярних транзисторів, які працюють в ключових режимах. Перехід від закритого стану транзистора ($u_{вих} \approx U_{КЕ}$) до відкритого ($u_{вих} \approx 0$) здійснюється за допомогою керуючого імпульсу, що подається на бази транзисторів.

В даний час тригери , завдяки своїм властивостям , стали базовими елементами цифрової техніки. Їх схемна реалізація в основному виконується з використанням логічних елементів **АБО-НЕ** чи **І-НЕ**. Тобто тригерний ефект поєднується з логічними операціями, що значно розширює їх сферу використання. Такий пристрій містить тригер і логічний пристрій керування (ЛПК), має два входи (інформаційний А і синхронізуючий С) і два виходи (прямий Q– вихідна інформація відповідає вхідній і інверсний $\overline{Q}$ – вихідна інформація є протилежною до вхідної, рис. 9.13.

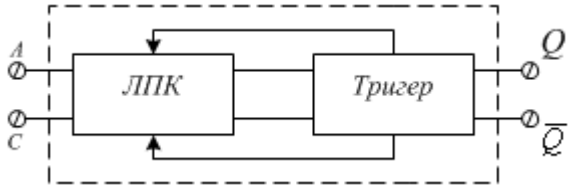


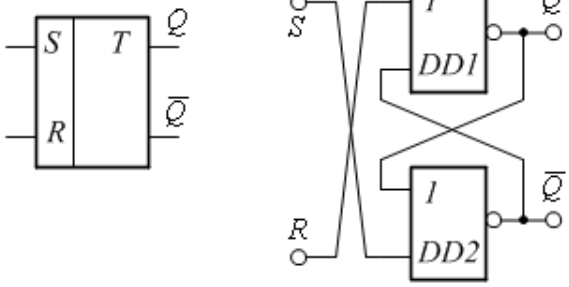
Рис. 9.13

Характерною особливістю тригера, як функціонального пристрою, є пам’ять – властивість запам’ятовувати біт інформації у двійковому коді “0” і “1”, тобто, залишатися в одному з двох станів після припинення дії керуючого сигналу.

Тригери широко використовуються в якості формувачів прямокутних імпульсів, дільників частоти, запам’ятовуючих пристроїв, в схемах лічильників, регістрів, електронних реле та ін.

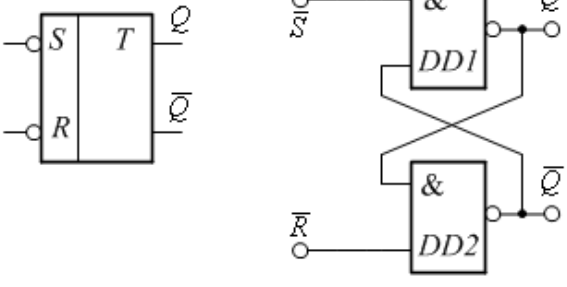
За своїм інформаційним призначенням тригери поділяють на *RS, D, T, JK*–тригери.

***RS*–тригери**. Відомо [7,8], що *RS*–тригери мають два інформаційні входи: одиничний *S* і нульовий *R*. На рис. 9.14, а подано умовне позначення *RS*–тригера і схема реалізована на логічних елементах АБО–НЕ, рис. 9.15, б.



а) б)

Рис. 9.14



а) б)

Рис. 9.15

При подачі імпульсу напруги (логічної одиниці) на вхід *S* і відсутності імпульсу напруги (логічного нуля) на вході *R*, на виходах логічних елементів **АБО–НЕ** отримаємо логічну одиницю *Q*=1 (вихід *DD1*) і логічний нуль $\overline{Q}=0$ (вихід *DD2*). Ці рівні напруги через зворотні зв'язки поступають на входи логічних елементів, внаслідок чого встановлюється стійкий стан рівноваги, який може змінитися тільки при зміні інформації на вході *S*.

Якщо *RS*–тригер виконано на логічних елементах **І–НЕ** (рис. 9.15), то в цьому випадку *Q*=1 за умови відсутності імпульсу на одиночному вході $\overline{S}=0$.

Такі тригери відносяться до тригерів з інверсним входом, тобто на входи потрібно подавати сигнали, протилежні до вказаних (на одиничний вхід – нуль, а на нульовий вхід одиницю).

***D*–тригери.** Відомо [7,8], що *D* – тригери мають інформаційний вхід *D* і один синхронізуючий вхід *C*, рис. 9.16.

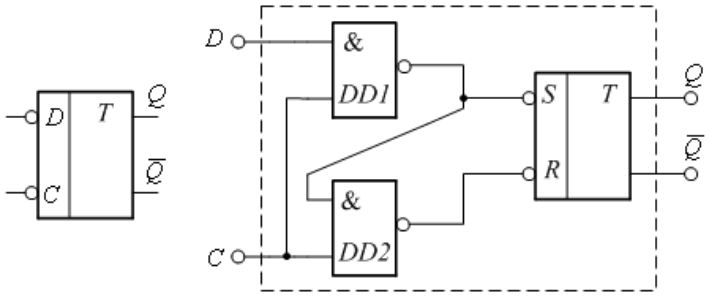


Рис. 9.16

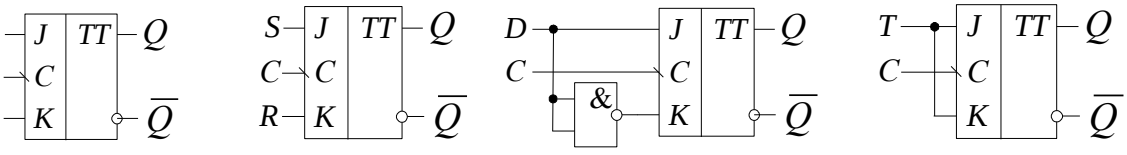
Вхідні сигнали через логічні елементи (*DD1* і *DD2*) проходять на входи тригера $\overline{S}$ і $\overline{R}$ тільки за умови наявності синхронізуючого сигналу на вході *C=1*. При відсутності такого сигналу логічні елементи І–НЕ (*DD1* і *DD2*) закриті й наявність сигналу на вході *D* не змінює стану тригера. За умови, що на входи *D* і *C* подаються логічні одиниці *D=1* і *C=1*, на виході *DD1* встановлюється «0» і в тригері записується інформація, яка існувала на вході *D*, тобто *Q*=1.

Такі тригери відносять до класу тригерів із затримкою часу, коли запис інформації відбувається за наявності синхронізуючого) імпульсу.

Т- тригер. Відомо [7,8], що Т- тригер, або лічильний тригер, має один інформаційний вхід. Його стан змінюється на протилежний після надходження кожного вхідного сигналу. За способом запису інформації Т- тригери можуть бути асинхронними і синхронними. Т- тригер – єдиний вид тригера, поточний стан якого визначається не інформацією на входах, а лише станом його на попередньому такті.

В Т-тригер можна легко перетворити раніш розглянутий синхронний *D*- тригер, якщо вхід *D* з'єднати з інверсним виходом, а вхід С замінити на Т.

***JK*– тригери**. Відомо [7,8], що *JK* − тригер має як і *RS* - тригер два керівних входи *J* і *K,* вхід синхронізації (*C*) і два виходи: прямий (*Q*) і інверсний ($\overline{Q}$), рис. 9.17, а. Якщо на вхід *J* подати сигнал із рівнем логічної 1, а на вхід *K* сигнал із рівнем логічного 0, то на виході встановиться сигнал логічної 1. Сигнал



а) б) в) г)

Рис. 9.17

з рівнем логічної 1 на вході *K* установлює тригер в 0, тобто при такій комбінації сигналів *JK* − тригер діє як *RS* − тригер. Якщо ж на обидва входи *JK* − тригера подати сигнал логічної одиниці, то під дією імпульсу синхронізації тригер перейде у протилежний стан, тобто коли на *J* і *K* входах діє сигнал логічної одиниці, то *JK* − тригер працює як *T*-тригер. *JK* − тригер зберігає попередній стан, тобто знаходиться у режимі зберігання інформації, якщо на обидва входи *J* і *K* подати сигнали логічного 0. *JK*− тригер називається універсальним, тому що на його основі можна реалізувати *RS*− тригер (рис. 9.17, б), *D*− тригер (рис. 9.17, в) і *T*− тригер (рис. 9.17, г). За способом записування інформації тригери поділяються на асинхронні та синхронні (тактовні). В асинхронних тригерах перемикання з одного стану в інший відбувається безпосередньо під дією інформаційних сигналів. В синхронних тригерах перемикання відбувається тільки при наявності синхронізуючого (тактового) сигналу.

Список питань для самоконтролю

1. Основні параметри операційного підсилювача.
2. Принципи роботи *RS*-тригеру.
3. Принцип роботи *D*-тригеру.
4. Принцип роботи *T*- тригеру.
5. Принцип роботи *JK*– тригеру.

Список рекомендованої літератури

1. Електротехніка: метод. рук. до вивч. дисц. / В.П. Хорольський, О.В. Омельченко; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, каф. загальноінженерних дисциплін та обладнання. - Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2022. – 99 с.
2. Теоретичні основи електротехніки: підручник / В.С. Хілов. - Д.: Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, 433 с. 2021 - 433 с.
3. Нова електротехніка: лекції професора В. Чабана з теоретичної електротехніки / Василь Чабан. - Львів : Простір М, 2019. - 354 с.
4. Електротехніка та електроніка: навчальний посібник / Уклад.: В.В. Михайленко, Д.К. Маков, О.М. Скринник, Ю.М. Чуняк, Д.К. Зіменков, О.В. Петрученко – К.: НТУУ ”КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. - 61 с.
5. Матвієнко, М. П. Основи електротехніки та електроніки: підручник / М. П. Матвієнко. – К. : Ліра - К, 2017. - 504 с.
6. О.М. Царенко. Основи фізики напівпровідників і напівпровідникових приладів: навчальний посібник. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2011. - 243 с
7. Цифрова схемотехніка та архітектура мікропроцесорів: навчальний посібник / Євсеєв С. П., Дженюк Н.В., Охрименко М.Ю. та ін. – Харків, – Львів: Видавництво ПП «Новий Світ – 2000», 2024. - 513 с.
8. Коман Б.П. Функціональні елементи інформаційних систем на базі напівпровідникової електроніки. Львів: ЛНУ, 2018. - 794 с.