

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

Київський національний університет технологій та
дизайну

Факультет ТОСУ

Кафедра електроніки та електротехніки

**“Електротехніка та основи
електроніки”**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(Електронна версія)

Кількість тем за навчальною програмою – 5

Кількість годин за планом – 18

Конспект склав – к.т.н., доцент кафедри
електроніки та електротехніки
Росінська Г.П.

Київ 2011

Перелік тем
за навчальною програмою
з дисципліни “Електротехніка та основи
електроніки”

№	Назва теми	Кіл-ть годин
	МОДУЛЬ 1. Електричні кола	
1	Електричні кола постійного струму.	4
2	Електричні кола однофазного синусоїдального струму	4
3	Електричні кола трифазного струму	2
	МОДУЛЬ 2. Основи електроніки	
4	Елементна база електронних пристроїв і систем	6
5	Електронні підсилювачі.	2

МОДУЛЬ 1. Електричні кола

Тема №1. Електричні кола постійного струму.

Лекція №1

Вступ. Основні поняття та закони для кіл постійного струму

План

1. Електрична енергія, її особливості, галузі застосування.
2. Основні поняття кола постійного струму. Структурний аналіз кіл.
3. Види з'єднань елементів, найпростіші еквівалентні перетворення.
4. Основні закони та формули: закони Ома та Кірхгофа, робота в колі постійного струму, потужність, баланс потужностей.

Електричним струмом називаємо упорядкований рух носіїв електричних зарядів.

Постійний струм - струм, який не змінюється з часом ні за напрямком, ні за величиною.

Електричне коло – це сукупність джерел живлення та споживачів електричної енергії, з'єднаних між собою тілами або середовищами, що забезпечують протікання електричного струму.

Джерелами електричної енергії є пристрої, які перетворюють інші види енергії в електричну (хімічну – в акумуляторах, сухих батареях; механічну – в електромеханічних генераторах). Пристрої, що споживають електричну енергію, називаються **приймачами електричної енергії** або навантаженням. Споживачі перетворюють електричну енергію в інші види енергії.

Кожен пристрій електричного кола має назву **елемента електричного кола**. Самим розповсюдженим елементом електричного кола є резистор, який характеризується таким параметром, як опір. Опір резистора (R) характеризує спроможність елемента перетворювати електричну енергію на теплову. Іноді замість поняття опору вживається поняття провідності. Провідність (g) – це величина зворотна опору: $g = 1/R$. Опір вимірюється в Омах (Ом), провідність – у Сименсах (См).

Величини електричного кола

До величин електричного кола належать:

- сила струму;
- напруга на елементах;
- електрорушійна сила.

Умовно-додатні напрями струму, напруги та ЕРС визначаються:

- умовно-додатний напрям струму (або просто напрям струму) - це напрям руху позитивних зарядів;

- умовно-додатний напрям напруги (або просто напрям напруги) - це напрям зменшення потенціалу;
- умовно-додатний напрям ЕРС (напряму ЕРС) – це напрям дії сторонніх сил на додатний заряд у джерелі живлення.

Додатні напрями струмів, напруг та ЕРС на схемах позначаються стрілками.

Прийняті позначення величин для кола постійного струму

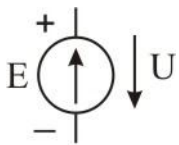
I – сила струму (одиниця виміру – Ампер);

U – напруга (одиниця виміру – Вольт);

E – електрорушійна сила джерела живлення (одиниця виміру – Вольт).

Умовні позначення елементів

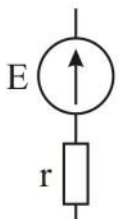
Графічне зображення електричного кола називається *схемою*. На схемах елементи кола позначаються наступним чином:



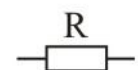
Джерело ЕРС – ідеалізоване джерело живлення, ЕРС якого постійна, не залежить від величини струму, що протікає через нього. Внутрішній опір джерела ЕРС дорівнює нулю.



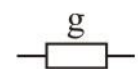
Джерело струму – ідеалізоване джерело струму, яке дає струм I , незалежний від величини навантаження R у колі. Внутрішній опір джерела струму наближається до нескінченності.



Реальне джерело живлення. Має кінцеве значення внутрішнього опору r .



Резистор з опором R



Резистор з провідністю g

Види електричних схем

Для зображення електричного кола використовують:

- ескізну схему;
- принципову;
- схему заміщення (еквівалентну).

Ескізне зображення електричного кола є наочним, але таку схему неможливо розрахувати.

Графічне зображення електричного кола, складеного з умовних позначень елементів, називається принциповою. Принципова схема електричного кола показує призначення всіх елементів та їх взаємодію, але, склавши тільки таку схему кола, не можна розрахувати його режим роботи. Для того, щоб виконати розрахунок, необхідно кожен з елементів представити схемою заміщення, тобто скласти схему заміщення (рис.1).

Приклад

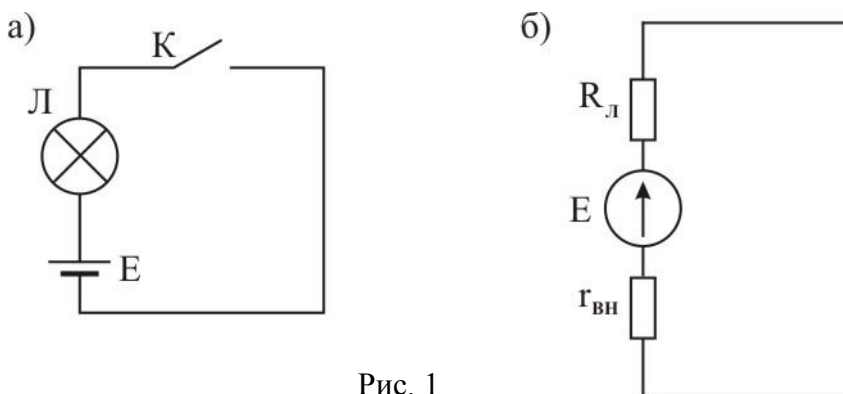


Рис. 1

Структурний аналіз електричних кіл

При зображенні електричного кола у вигляд схеми вводять поняття вузла, гілки, контуру, незалежного контуру.

Вузол - точка схеми, в якій сходяться три і більше гілок.

Гілка –ділянка кола, розташована між двома вузлами, по елементам якої тече однаковий струм.

Контур – будь-який замкнений шлях електричного кола.

Незалежний контур – контур, який відрізняється від будь-якого іншого хоча би однією новою гілкою. Кількість незалежних контурів визначається за формулою $l = m - (n - 1)$.

Метою структурного аналізу схеми є визначення кількості вузлів n , гілок m і незалежних контурів l .

Приклад (рис.2) :

$n = 2$
 $m = 3$
 $l = 2$

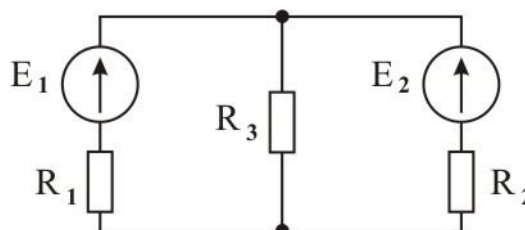


Рис. 2

Види з'єднання резисторів

1) послідовне з'єднання (рис.3)

При послідовному з'єднанні через всі елементи проходить однаковий струм. При такому з'єднанні для спрощення схеми послідовно з'єдані резистори і джерела ЕРС замінюються одним резистором з еквівалентним опором, що знаходиться за формулою:

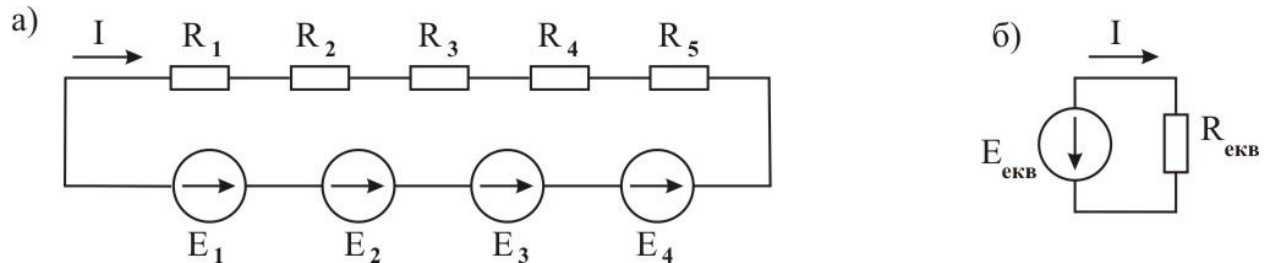


Рис. 3. а) коло послідовного з'єднання резисторів;
б) еквівалентне перетворення кола

$$R_{екв} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k ,$$

і одним джерелом з еквівалентною ЕРС: $E_{екв} = \sum_{k=1}^m E_k .$

2) паралельне з'єднання

При паралельному з'єднанні елементів напруга на них однакова внаслідок під'єднання їх до двох загальних вузлів. Еквівалентний опір визначається за формулою:

$$\frac{1}{R_{екв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} ,$$

або, замінивши опори їх провідностями, маємо еквівалентну провідність:

$$G_{екв} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k$$

Приклад 1 (рис.4).

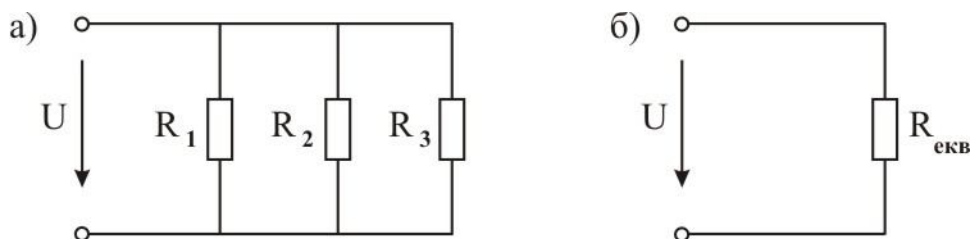


Рис. 4

$$\frac{1}{R_{екв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Приклад 2 (рис.5).

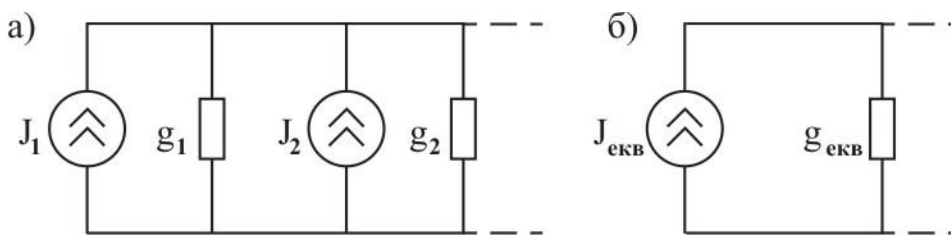


Рис. 5

$$g_{екв} = g_1 + g_2 + \dots + g_n = \sum_{k=1}^n g_k$$

$$J_{екв} = J_1 + J_2 + \dots + J_n = \sum_{k=1}^n J_k$$

3) змішане з'єднання (рис.6)

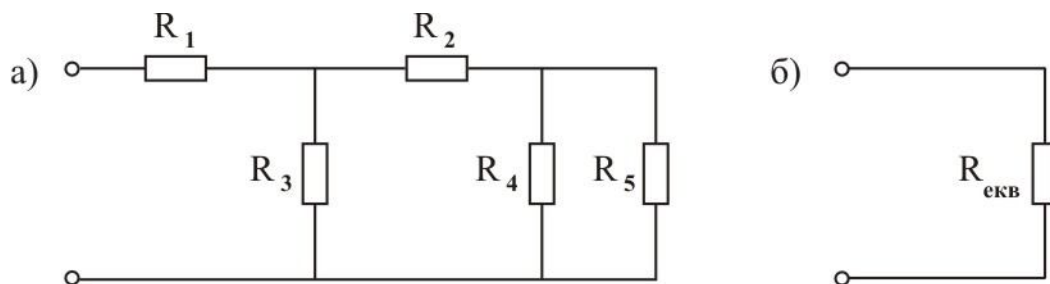


Рис. 6

$$R_{екв} = R_1 + \frac{R_3 \left(R_2 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right)}{R_3 + \left(R_2 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right)}$$

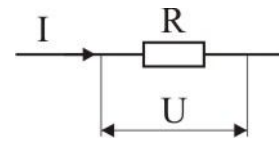
Існуючі типи задач розрахунку електричних кіл

Задачі розрахунку електричних кіл розподіляються на *прямі* і *зворотні*. *Пряма задача* формулюється наступним чином: по відомим значенням параметрів джерела та споживачів визначити струми, напруги та потужності на всіх елементах кола. *Зворотня задача* – по відомому значенню струму, напруги або потужності на певній гілці визначити струми інших гілок або визначити параметри джерел. Для розрахунків використовуємо наступні формули та закони.

Закони та формули для електричних кіл постійного струму

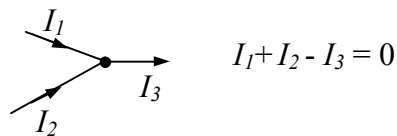
1) **Закон Ома для ділянки кола:** Сила струму на ділянці кола прямо пропорційна напрузі прикладеній до кінців цієї ділянки і обернено пропорційна його опору.

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



2) **Перший закон Кірхгофа:** Алгебраїчна сума струмів, що втікають і витікають з вузла, дорівнює нулю: $\sum_{k=1}^n I_k = 0$

Приклад:



Струми, що втікають у вузол, беремо зі знаком “+”, а які витікають з вузла – зі знаком “-”.

Перший закон Кірхгофа можна формулювати і таким чином: Алгебраїчна сума струмів, що втікають у вузол, дорівнює алгебраїчній сумі струмів, що витікають з нього.

3) Другий закон Кірхгофа:

Алгебраїчна сума ЕРС в замкненому контурі дорівнює алгебраїчній сумі падінь напруг на елементах контуру.

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

4) **Робота в колі постійного струму** визначається як робота по переміщенню заряду q під дією різниці потенціалів: $A = qU$. Так як $q = It$, то роботу можна визначити як $A = ItU$.

Потужність – це робота, яка виконується електричним полем за одиницю часу: $P = \frac{A}{t}$.

5) **Потужність, що виділяється на резисторі:** $P_{\bar{n}} = I^2 R$ або $P_{\bar{n}} = UI$

Одиницею потужності є Ватт (Вт).

6) **Потужність джерела ЕРС:** $P_{\delta} = EI$ або $P_{\delta} = UI$ (де I – струм через джерело ЕРС); **потужність джерела струму:** $P = UJ$ (де U - напруга на джерелі струму).

7) *Баланс потужності:*

Потужність усіх джерел живлення електричного кола дорівнює сумі потужностей усіх споживачів цього кола

$$\sum_{k=1}^n P_{dk} = \sum_{k=1}^m P_{ck} \quad \text{або} \quad \sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^m I_k^2 R_k .$$

Цей закон є наслідком закону збереження енергії.

Якщо напрямки ЕРС та струму збігаються, то джерело віддає потужність у навантаження. У цьому разі добуток $E_k I_k$ треба брати із знаком "+". Якщо напрямки ЕРС та струму протилежні, то джерело працює у режимі споживача. В цьому разі добуток $E_k I_k$ треба брати із знаком "-".

Література:

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник.-3-є вид. – К.: Каравела, 2009 – 296с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983
4. Титаренко М.В. Електротехніка: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних (неелектротехнічних) спеціальностей вузів. – К.:Кондор, 2009 – 240с.

Контрольні питання:

1. Пояснити поняття: електричне коло (лінійне, нелінійне, просте, розгалужене, складне).
2. Пояснити поняття: джерело струму, джерело електрорушійної сили (ЕРС).
3. Пояснити поняття: схема кола, гілка, вузол, незалежний контур.
4. Як на схемах позначаються елементи електричних кіл?
5. Дати визначення провідності.
6. Як на схемі позначаються додатні напрямки струмів у гілках, а також зв'язані з ними додатні позначення напруг на елементах кола?
7. Як формулюється закон Ома для ділянки кола?
8. Записати формулу для визначення струму в гілці, що містить джерело ЕРС і резистор, при відомих потенціалах вузлів.
9. Чим відрізняються поняття напруга, спад напруги, різниця потенціалів?
10. Пояснити ціль еквівалентних перетворень.
11. Пояснити найпростіші еквівалентні перетворення при паралельному та послідовному з'єднанні.
12. Як формулюються перший і другий закони Кірхгофа?
13. Визначити формули для підрахунку роботи та потужності

електричного струму.

14. За якою формулою визначається потужність джерела ЕРС?
15. За якою формулою визначається потужність, що розсіюється на резисторі?
16. Сформулювати баланс потужності для електричного кола постійного струму. На чому він базується?
17. Для чого складається баланс потужностей? Записати рівняння балансу потужностей для кола, складеного з джерел ЕРС та резисторів.

Питання та завдання для самостійної роботи:

1. Накресліть електричну схему за наявністю в ній ЕРС з внутрішнім опором та опором зовнішнього навантаження. Напишіть закон Ома для всього кола, для ділянки кола, виведіть формулу для падіння напруги на опорі зовнішнього навантаження.
2. Чим відрізняються джерела напруги від джерел струму? Накресліть джерело струму, навантаженого пасивним споживачем електричної енергії. Розрахуйте величину струму через опір (споживач) і падіння напруги на ньому.
3. Ділянка кола складається з двох паралельно включених резисторів з опорами R_1 та R_2 та послідовно з ними включеного R_3 . Виведіть формулу для еквівалентного опору.

Лекція №2

Застосування законів Кірхгофа для аналізу складних електричних кіл

План

1. Алгоритми складання рівнянь за першим і другим законом Кірхгофа, приклади розв'язку задач.
2. Еквівалентні перетворення «трикутника» і «зірки».
3. Потенційна діаграма.

Розрахунок електричних кіл постійного струму класичним методом

Використовуючи закони Кірхгофа і Ома, можна розрахувати практично будь-яке коло. Як правило, бувають задані: схема з'єднання, а також чисельні значення і напрямки джерел ЕРС, чисельні значення опорів резисторів. Необхідно розрахувати струми всіх гілок, а по струмах легко розраховуються потужність, падіння напруги та ін.

Отже, розв'язуючи задачу за законами Кірхгофа, спочатку потрібно визначити кількість рівнянь, які необхідно записати за 1-м та за 2-м законами Кірхгофа.

Якщо схема містить вузлів "n", а гілок "m", то слід мати за обома законами Кірхгофа "m" незалежних рівнянь, тобто таких, які не повторюються.

За 1-м закон Кірхгофа необхідно скласти рівнянь на одне менше, ніж кількість вузлів:

$$k_I = n - 1$$

За 2-м законом Кірхгофа потрібно скласти кількість рівнянь, що визначається за формулою:

$$k_{II} = m - (n - 1)$$

Розглянемо порядок складання рівнянь на прикладі схеми по рис.7.

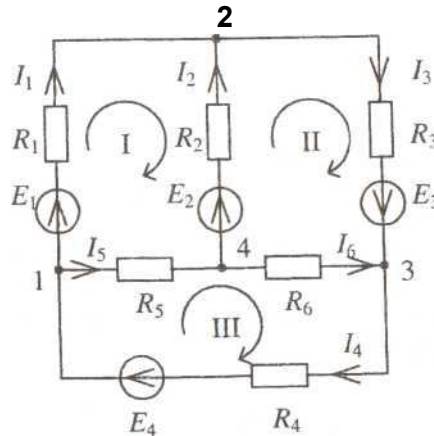


Рис.7.

За першим законом Кірхгофа:

1) *Визначаємо кількість вузлів n.*

У даній схемі вузлів $n = 4$, позначимо їх цифрами 1, 2, 3, 4. Отже, по першому закону Кірхгофа потрібно скласти три рівняння:

$$k_I = n - 1 = 4 - 1 = 3.$$

2) За 1-м законом Кірхгофа не будемо складати рівняння для одного з вузлів, наприклад 4-го. *Приймаємо умовно додатні напрями струмів гілок і показуємо їх на схемі.* Як правило, у гілках з ЕРС ці струми направляють по ЕРС, а у пасивних гілках (що не містять ЕРС) — довільні. Бажано, щоб індекс струму гілки і опору даної гілки співпадали, тобто у гілці з R_1 струм I_1 і т.п.

3) *Складаємо рівняння.* При запису рівнянь за 1-м законом Кірхгофа будемо дотримуватися **правила знаків**: струми, які входять у вузол, записуємо зі знаком "плюс", а ті, які виходять із вузла — зі знаком "мінус".

Для вузла 1: $-I_1 + I_4 - I_5 = 0$;

Для вузла 2: $I_1 + I_2 - I_3 = 0$;

Для вузла 3: $I_3 - I_4 + I_6 = 0$.

За другим законом Кірхгофа:

1) *Визначаємо кількість незалежних контурів.* У схемі гілок $m = 6$, отже, кількість невідомих струмів також дорівнює m , тобто 6. За 2-м законом Кірхгофа необхідно скласти також три рівняння:

$$k_{II} = m - (n - 1) = 6 - 3 = 3.$$

2) Щоб приступити до складання рівнянь за 2-м законом Кірхгофа, необхідно вибрати контури та напрямки обходу контурів, бажано ці напрямки обирати в один бік, наприклад, за годинниковою стрілкою.

3) *Складаємо рівняння.* При записі рівнянь за 2-м законом Кірхгофа будемо дотримуватися **правила знаків**: з "плюсом" записуємо ті ЕРС, напрям яких співпадає з обраним напрямом обходу контуру (зустрічні — зі знаком "мінус"), падіння напруги на резисторі записується з плюсом, якщо співпадають напрямки струму в даній гілці і напрямком обходу контуру.

Виконавши ці підготовчі етапи, складаємо рівняння за 2-м законом Кірхгофа:

$$\text{Контур I:} \quad R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_5 I_5 = E_1 - E_2;$$

$$\text{Контур II:} \quad R_2 I_2 + R_3 I_3 - R_6 I_6 = E_2 + E_3;$$

$$\text{Контур III:} \quad R_4 I_4 + R_5 I_5 + R_6 I_6 = E_4.$$

Розв'язуючи сумісно ці 6 рівнянь, можна розрахувати 6 невідомих струмів. Якщо струм у якійсь гілці отримано зі знаком "мінус", це означає, що ми помилилися у напрямку струму і його необхідно направити у протилежну сторону. Проте, рішення задачі з шістьма рівняннями дуже громіздке і тому використання безпосередньо законів Кірхгофа практично доцільне для розрахунку більш простих за конфігурацією схем. А для схем, подібних наведеній на рис.1, розроблені більш прості методи розрахунку (контурних струмів, вузлових потенціалів).

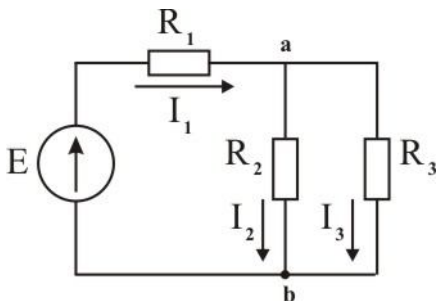


Рис. 8

Приклади розв'язку задач

Задача 1 (приклад постановки прямої задачі).

В електричному колі, наведеному на рис.8, електрорушійна сила джерела $E=50\text{В}$, а опори резисторів дорівнюють $R_1=10\text{ Ом}$, $R_2=20\text{ Ом}$, $R_3=20\text{ Ом}$. Визначити значення струмів I_1, I_2, I_3 .

Розв'язання

1) Для розв'язку задачі використовуємо еквівалентне перетворення:

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{20 \cdot 20}{40} = 10(\text{Ом}).$$

2) Визначаємо еквівалентний опір схеми: $R_{\text{екк}} = R_1 + R_{23} = 10 + 10 = 20(\text{Ом})$.

3) Застосовуємо закон Ома для замкненого кола для визначення струму на нерозгалуженій ділянці кола: $I_1 = \frac{E}{R_{\text{екк}}} = \frac{50}{20} = 2,5(\text{А})$.

4) Знаходимо напругу на ділянці ab : $U_{ab} = I_1 \cdot R_{23} = 2,5 \cdot 10 = 25(\text{В})$.

5) За законом Ома визначаємо струм через резистор з опором R_2 :

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{25}{20} = 1,25(\text{А}).$$

б) За першим законом Кірхгофа знаходимо струм через резистор R_3 :
 $I_3 = I_1 - I_2 = 2,5 - 1,25 = 1,25(A)$.

7) Правильність розв'язку задачі перевіряємо за допомогою балансу потужності:

$$EI_1 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3$$

$$50 \cdot 2,5 = 2,5^2 \cdot 10 + 1,25^2 \cdot 20 + 1,25^2 \cdot 20$$

$$125 \text{ Дж} = 125 \text{ Дж}$$

Одержуємо, що енергія джерела ЕРС дорівнює енергії, яка виділяється на резисторах. Це є доказом правильності розв'язку задачі.

Задача 2 (приклад зворотної задачі). Для електричного кола (рис.8) задані значення опорів $R_1=10$ Ом, $R_2=5$ Ом, $R_3=10$ Ом і струму $I_3 = 2A$. Визначити струми I_1 , I_2 та ЕРС джерела.

Розв'язання

1) Визначаємо напругу на ділянці ab : $U_{ab} = I_3 \cdot R_3 = 2 \cdot 10 = 20(B)$.

2) Для розрахунку струму через резистор R_2 скористаємося законом Ома для ділянки кола: $I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{20}{5} = 4(A)$.

3) Для знаходження струму I_1 застосуємо перший закон Кірхгофа: $I_1 = I_2 + I_3 = 4 + 2 = 6(A)$.

4) Визначаємо падіння напруги на резисторі R_1 : $U_1 = I_1 R_1 = 6 \cdot 10 = 60(B)$.

5) Знаходимо ЕРС джерела за другим законом Кірхгофа: $E = U_1 + U_{ab} = 60 + 20 = 80(A)$.

6) Для перевірки правильності розв'язку задачі складаємо баланс потужності:

$$EI_1 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3$$

$$80 \cdot 6 = 6^2 \cdot 10 + 4^2 \cdot 5 + 2^2 \cdot 10$$

$$480 \text{ Дж} = 480 \text{ Дж}$$

Рівність лівої та правої частин рівняння балансу є доказом правильності розв'язання задачі.

Задача 3. Для електричного кола, зображеного на рис.3, з такими параметрами: $E_1=120B$, $E_2=20B$, $E_3=80B$, $R_1=R_2=2$ Ом, $R_3=40$ Ом, $R_4=50$ Ом, визначити всі струми за допомогою методу Кірхгофа.

Розв'язання

Спочатку проводимо структурний аналіз: визначаємо кількість вузлів і незалежних контурів. Потім довільно обираємо напрямки струмів в гілках

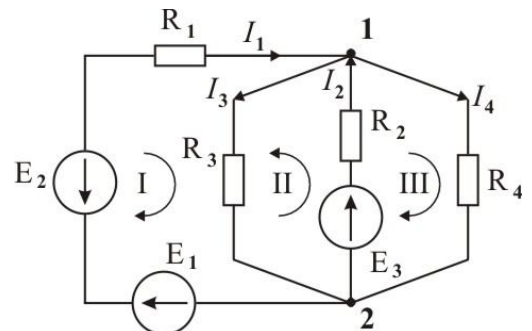


Рис. 9

і напрямки обходу контурів (за годинниковою чи проти годинникової стрілки).

1) Кількість вузлів $n=2$, тому складаємо одне рівняння за першим законом Кірхгофа для вузла 2:

$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0.$$

2) Так як кількість незалежних контурів $l=3$, то складаємо три рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$\begin{cases} R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1 - E_2 \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_3 \\ R_2 I_2 + R_4 I_4 = E_3 \end{cases}$$

В результаті маємо систему чотирьох рівнянь, в якій кількість невідомих дорівнює кількості рівнянь.

3) Враховуючи початкові дані, розв'язуємо систему відносно струмів:

$$\begin{cases} -I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0 \\ 2I_1 + 40I_3 = 120 - 20 \\ 2I_2 + 40I_3 = 80 \\ 2I_2 + 59I_4 = 80 \end{cases}$$

Розв'язання цієї системи рівнянь дає значення струмів:

$$I_1 = 6.94A, \quad I_2 = -3.06A, \quad I_3 = 2.15A, \quad I_4 = 1.72A.$$

Від'ємне значення струму показує, що дійсний напрямок струму протилежний.

Еквівалентні взаємні перетворення "трикутник-зірка"

Нерідко більш складні схеми вдається спростити і розрахувати $R_{\text{екв}}$, якщо застосувати перетворення "трикутник-зірка", або "зірка-трикутник".

Необхідно пам'ятати правило, що одну схему можна замінити на еквівалентну, якщо при тих же напругах будуть протікати ті ж самі струми або, іншими словами, якщо в заданій і еквівалентній схемах будуть рівними відносно затискачів вхідні опори.

Розглянемо перехід від трикутника з опорами R_{12} , R_{23} , R_{31} до еквівалентної зірки з опорами R_1 , R_2 , R_3 (рис. 10).

Будемо вважати відомими R_{12} , R_{23} , R_{31} . Виведемо формули для розрахунку R_1 , R_2 , R_3 . Вхідний опір на затискачах 1-2 для трикутника при розірваній гілці 3:

$$R_{\tilde{a}\tilde{b}_{1-2}\Delta} = \frac{R_{12} \cdot (R_{23} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (1)$$

Вхідний опір на затискачах 1-2 для зірки:

$$R_{\tilde{a}\tilde{b}_{1-2}\Gamma} = R_1 + R_2. \quad (2)$$

Ці вхідні опори повинні бути рівними:

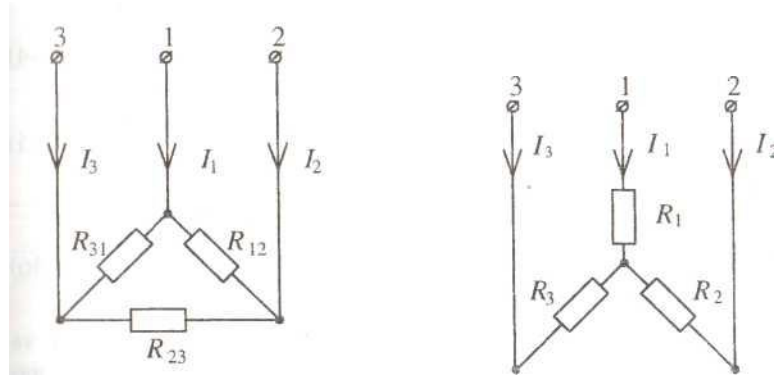


Рис.10.

$$\frac{R_{12} \cdot (R_{23} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = R_1 + R_2. \quad (3)$$

Аналогічно запишемо вхідні опори для затискачів 2-3 та 3-1:

$$R_{\overset{\Delta}{a\tilde{a}b_2-3}} = \frac{R_{23} \cdot (R_{12} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (4)$$

$$R_{\overset{Y}{a\tilde{a}b_2-3}} = R_2 + R_3. \quad (5)$$

Звідси:

$$\frac{R_{23} \cdot (R_{12} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = R_2 + R_3. \quad (6)$$

Аналогічно:

$$R_{\overset{\Delta}{a\tilde{a}b_3-1}} = \frac{R_{31} \cdot (R_{12} + R_{23})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (7)$$

$$R_{\overset{Y}{a\tilde{a}b_3-1}} = R_1 + R_3. \quad (8)$$

Звідси:

$$\frac{R_{31} \cdot (R_{12} + R_{23})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = R_1 + R_3. \quad (9)$$

Розв'яжемо сумісно отримані рівняння (3), (6) та (9). Виконаємо для лівої та правої частин відповідно наступні алгебраїчні перетворення (3) - (6) + (9) Тоді отримаємо:

$$\frac{R_{12} \cdot R_{23} + R_{12} \cdot R_{31} - R_{12} \cdot R_{23} - R_{23} \cdot R_{31} + R_{12} \cdot R_{31} + R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = R_1 + R_2 - R_2 - R_3 + R_1 + R_3 \quad (10)$$

Після скорочень отримаємо:

$$2R_1 = \frac{2R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (11)$$

І в решті-решт:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (12)$$

Формули для розрахунку R_2 та R_3 можна отримати, якщо виконати аналогічні алгебраїчні перетворення:

$$(3) + (6) - (9);$$

$$-(3) + (6) + (9).$$

Також за отриманою формулою (12) можна вивести правило визначення опору променя еквівалентної зірки: **Потрібно перемножити опори тих сторін трикутника, які сходяться у вершині і поділити на суму опорів сторін трикутника.**

Таким чином, формули для розрахунку R_2 та R_3 запишемо за аналогією з (12):

$$R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (13)$$

$$R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (14)$$

Якщо трикутник симетричний, тобто всі його сторони рівні, тоді згідно з формулами (12)-(14) опори променів еквівалентної зірки також будуть рівні:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{R_{\Delta}}{3}. \quad (15)$$

Еквівалентні взаємні перетворення “зірка-трикутник”



Рис. 11

Будемо вважати відомими R_1, R_2, R_3 . Виведемо формули для розрахунку R_{12}, R_{23}, R_{31} .

Щоб скласти рівняння для такого перетворення, поділимо (14) на (12) відповідно, тобто ліву частину на ліву, а праву на праву, одержимо:

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_{23} \cdot R_{31} \cdot (R_{12} + R_{23} + R_{31})}{R_{12} \cdot R_{31} \cdot (R_{12} + R_{23} + R_{31})} = \frac{R_{23}}{R_{12}}. \quad (16)$$

Аналогічно поділимо (14) на (13):

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_{23} \cdot R_{31} \cdot (R_{12} + R_{23} + R_{31})}{R_{12} \cdot R_{23} \cdot (R_{12} + R_{23} + R_{31})} = \frac{R_{31}}{R_{12}}. \quad (17)$$

Підставимо (16) та (17) в (12):

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{12} \cdot \frac{R_3}{R_2}}{R_{12} + R_{12} \cdot \frac{R_3}{R_1} + R_{12} \cdot \frac{R_3}{R_2}} = \frac{R_{12}^2 \cdot \frac{R_3}{R_2}}{R_{12} + R_{12} \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2}\right)}. \quad (18)$$

Або

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_3}{R_2 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2}}. \quad (19)$$

$$\text{Звідси: } R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}{R_3} = R_1 + R_2 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_3}. \quad (20)$$

По аналогії :

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}. \quad (21)$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}. \quad (22)$$

Перетворення $\Delta \rightarrow Y$ або $Y \rightarrow \Delta$ у деяких випадках дає змогу складну схему звести до змішаного з'єднання, тоді легко визначати $R_{\text{екв}}$ на затискачах джерела і розраховуються всі параметри схеми.

Приклад

Характерним прикладом спрощення розрахунків із застосуванням метода перетворення кіл може служити перетворення мостової схеми з'єднання резистивних елементів (рис.6, а). Після заміни частини кола за схемою трикутник еквівалентним колом за схемою зірка все коло (рис.6, б) можна розглядати як змішане з'єднання резистивних елементів.

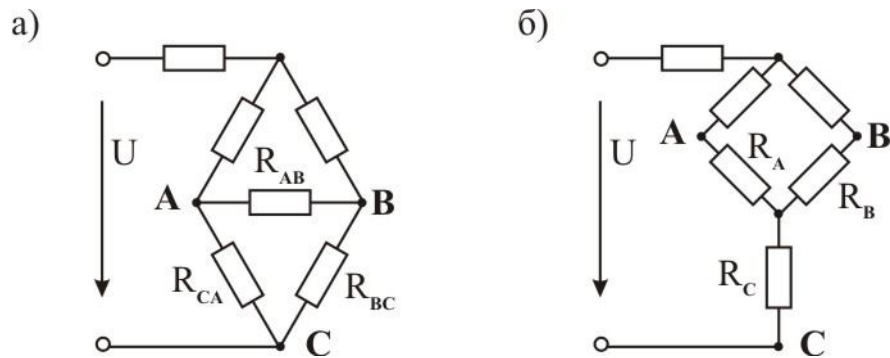


Рис. 12

Побудова потенційних діаграм

Потенційна діаграма – це графічне зображення зміни потенціалу при обході замкненого контуру. При цьому по осі абсцис відкладається опір між характерними точками, а по осі ординат – їх потенціали.

Щоб розрахувати коло *методом побудови потенційної діаграми*, необхідно:

а) розрахувати коло (визначити всі струми, напруги, їх напрямки, загальний опір $R_{\text{заг}}$);

б) коло розбити характерними точками, що розділяють опори та ЕРС;

в) задати довільно напрям обходу;

г) прийняти рівним нулю потенціал однієї з точок схеми ($\varphi=0$ – з цієї точки починаємо побудову діаграми, йдучи в напрямку обходу контуру);

д) виходячи з $R_{\text{заг}}$ кола вибрати масштаб по осі абсцис і відкласти опори між характерними точками;

е) після аналізу потенціалів вузлів і ЕРС, вибрати масштаб потенціалів по осі ординат і відкласти потенціали характерних точок:

- якщо напрям обходу збігається з напрямом ЕРС, то потенціал треба відкладати із знаком “+”;

При цьому необхідно враховувати, що струм через резистор тече від більшого потенціалу до меншого, а внутрішній опір джерела ЕРС дорівнює нулю.

Приклад. Побудуємо векторну діаграму контуру $abcd$ (рис. 13).

Потенціал вузла a приймаємо за нуль: $\varphi_a = 0$. Визначаємо потенціали інших точок за формулами: $\varphi_b = I_1 R_1$;

$$\varphi_c = \varphi_b - I_2 R_2;$$

$$\varphi_d = \varphi_c + E_1;$$

$$\varphi_e = \varphi_d - E_3;$$

$$\varphi_f = \varphi_e - E_2;$$

$$\varphi_a = \varphi_f + I_3 R_3.$$

У масштабі по осі абсцис відкладаємо опір кожної ділянки, пам'ятаючи, що внутрішній опір джерела ЕРС дорівнює нулю; по осі ординат у масштабі відкладаємо потенціали точок.

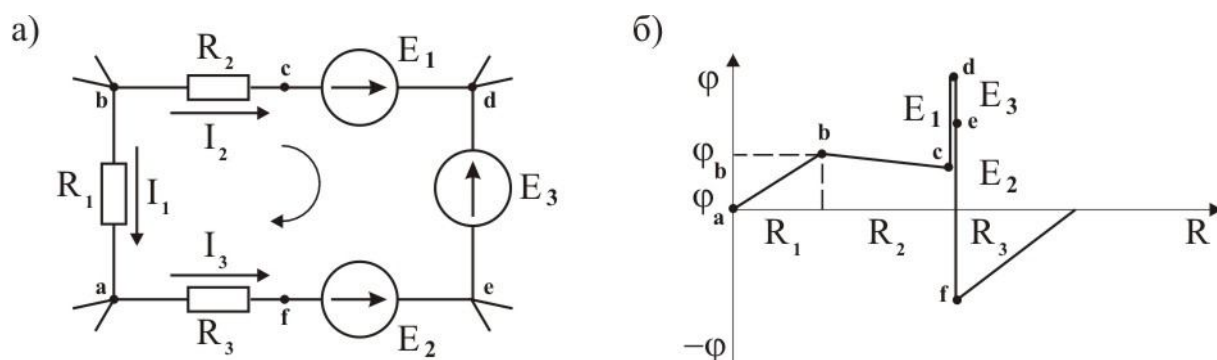


Рис. 13

Література:

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник.-3-є вид. – К.: Каравела, 2009 – 296с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983
4. Титаренко М.В. Електротехніка: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних (неелектротехнічних) спеціальностей вузів. – К.:Кондор, 2009 – 240с.

Контрольні питання:

1. Яку мінімальну кількість рівнянь складають за першим і другим законами Кірхгофа при розрахунку електричного кола кластичним методом (методом законів Кірхгофа)?
2. Проаналізувати застосування законів Кірхгофа для розрахунку кіл

- постійного струму на прикладі.
3. Які бувають види еквівалентних перетворень?
 4. Які умови еквівалентності перетворення?
 5. Пояснити сутність перетворення трикутника опорів в зірку. Навести формулу для розрахунку опорів зірки.
 6. Пояснити сутність перетворення з'єднання опорів зіркою в еквівалентний трикутник. Навести формулу для розрахунку опорів трикутника.
 7. Пояснити формулу перетворення трикутника опорів в еквівалентну зірку (і зворотного перетворення).
 8. Пояснити порядок побудови потенційної діаграми заданого контуру кола на прикладі.

Питання та завдання для самостійної роботи:

1. Перелічити методи розрахунку електричних кіл.
2. Пояснити сутність методу контурних струмів для розрахунку складних кіл.
3. Яку перевагу має метод контурних струмів перед класичним методом (методом за законами Кірхгофа)? Як виводиться система рівнянь методу контурних струмів? Як у цьому методі визначаються струми гілок? Показати на прикладі.
4. У яких випадках доцільно застосовувати метод вузлових потенціалів? Як виводиться система рівнянь методу вузлових потенціалів? Як у цьому методі визначаються струми? Пояснити на прикладі.
5. За яких умов метод вузлових потенціалів має переваги перед методом контурних струмів?
6. У якому випадку при розрахунку електричних кіл застосовують метод еквівалентного генератора? Як виводиться основна формула методу еквівалентного генератора? Як визначити ЕРС еквівалентного генератора? Показати на прикладі.

Тема №2. Електричні кола однофазного синусоїдального струму

Лекція № 3

Вступ. Основні параметри та засоби зображення однофазного синусоїдального струму. Закони для змінного струму

План

1. Змінний струм, його переваги перед постійним струмом і застосування.
2. Основні поняття, параметри синусоїдального струму, засоби зображення.
3. Елементи кіл змінного струму.

4. Закони Ома і Кірхгофа.

Змінний струм: основні поняття. Галузі застосування змінного струму

Змінний струм - струм, який змінює і величину, і напрямок у часі. Як джерела живлення в техніці використовують генератори. Генератори змінного струму простіші у виготовленні, надійніші та дешевші за генератори постійного струму. Часто вживаються дуже прості і надійні двигуни змінного струму, особливо асинхронні двигуни. Ще однією суттєвою перевагою кіл змінного струму є можливість його передачі на великі відстані. У промисловості здебільшого використовують змінний синусоїдальний струм.

Синусоїдальний струм - змінний струм, що змінюється за гармонічним (або синусоїдальним) законом.

Відмінність електричних кіл змінного струму від аналогічних кіл постійного струму полягає в тому, що математичний апарат їх дослідження стає більш громіздким, адже у рівняннях використовуються напруги і струми, що змінюються за гармонічним законом. Для спрощення задач аналізу в електротехніці використовуються графічні методи.

Основні параметри змінного синусоїдального струму

Миттєві значення синусоїдальної величини визначаються за такими формулами:

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i) \\ u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u), \\ e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e) \end{aligned} \quad (23)$$

де i, u, e - миттєві значення сили струму, напруги та ЕРС.

На рис.14 продемонстровано графічне зображення синусоїдального сигналу

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

в залежності від часу з початковою фазою ψ_u , амплітудою U_m та кутовою частотою ω (одиниця вимірювання – рад/с, або с^{-1}).

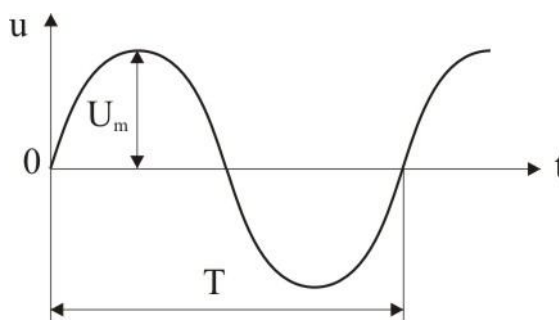


Рис. 14

Основними параметрами змінного сигналу є:

а) **період (T)** – час одного повного коливання; період зв'язаний з кутовою частотою ω формулою $T = \frac{2\pi}{\omega}$; одиниця вимірювання – с (секунда);

б) **частота коливань (f)** – кількість коливань за одиницю часу; частота зв'язана з періодом формулою $T = \frac{1}{f}$; кутова частота ω зв'язана з лінійною

частотою f : $\omega = 2\pi f$; одиниця вимірювання – Гц (Герц); стандартною промисловою частотою на Україні є частота 50 Гц;

в) **амплітуда коливань** – максимальне значення синусоїдальної величини (U_m, I_m, E_m - амплітуди напруги, струму та ЕРС);

г) **початкова фаза коливань** (ψ_i, ψ_u, ψ_e) – визначає значення величин в початковий момент часу ($t=0$); одиниця вимірювання - радіан. Початкова фаза завжди відраховується по осі абсцис від найближчого до початку координат нульового значення синусоїдальної величини, при її переході від від'ємних значень до додатних, до початку координат.

д) **фаза коливань** ($\omega t + \psi$) - визначає миттєві значення величини (i, u або e); одиниця вимірювання – радіан.

Різницю фаз між напругою на елементі і струмом через нього позначають через $\varphi = \psi_u - \psi_i$. Якщо $\varphi > 0$, то говорять, що напруга на елементі випереджає струм за фазою, якщо $\varphi < 0$, то напруга відстає за фазою від струму.

У практиці широко використовуються поняття *діючого значення* та *середнього значення* синусоїдальної величини. **Діючим значенням** синусоїдального струму є значення такого постійного струму, що виробляє еквівалентну змінному струму теплову чи механічну дію. Діюче значення струму, напруги та ЕРС позначаються як I, U і E та визначаються за формулами:

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

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

З аналізу формул витікає, що діюче значення величин в $\sqrt{2}$ разів менше, ніж їх амплітудні значення.

Середнє значення синусоїдальних величин визначається за формулами:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{2I_m}{\pi}$$

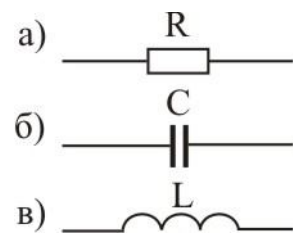
$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{2U_m}{\pi}$$

$$E_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T e(t) dt = \frac{2E_m}{\pi}$$

Елементи електричних кіл змінного струму

а) Резистивний елемент (рис. 15,а)

Опір резистивного елемента в колі змінного струму називається **активним**. В резистивних елементах електрична енергія корисно перетворюється в інші види енергії або розсіюється як тепло.



б) Індуктивний елемент

Індуктивний елемент уявляє собою котушку, намотану на магнітному або немагнітному осерді, по обмотках якої протікає струм. Індуктивний елемент характеризується індуктивністю L . Схематичне позначення котушки індуктивності на електричних схемах наведено на рис. 15, в.

Напруга на котушці індуктивності пов'язана зі струмом через неї формулою:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

Величина $X_L = \omega L$ має розмірність опору і називається індуктивним опором. Індуктивний опір відрізняється від активного і має назву **реактивного опору**. Індуктивний опір $X_L = \omega L$ підвищується з підвищенням частоти струму та індуктивності елемента. Індуктивність у колі постійного струму не має реактивного опору.

Величина, обернено пропорційна індуктивному опору, називається реактивною індуктивною провідністю b_L : $b_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L}$.

в) Конденсатор

Схематичне позначення конденсатора наведено на рис.15,б. *Ємністю конденсатора* називається відношення електричного заряду q до різниці потенціалів між його електродами U_C : $C = \frac{q}{U_C}$. Між зарядом q і струмом через конденсатор i_C , що забезпечує зміну заряду, існує зв'язок:

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$$

Напругу на конденсаторі можна виразити через струм: $u_C = \frac{1}{C} \int i(t) dt$.

Величина $X_C = \frac{1}{\omega C}$ має розмірність опору та називається ємнісним опором. Ємнісний опір, як і індуктивний, є **реактивним опором**. Ємнісний опір $X_C = \frac{1}{\omega C}$ постійному струму дорівнює нескінченності і зменшується при підвищенні частоти змінного струму та ємності елемента.

Величина, обернено пропорційна ємнісному опору, називається реактивною ємнісною провідністю b_C : $b_C = \frac{1}{X_C} = \omega C$.

Будь-який реальний резистивний елемент в колах змінного струму має і деяку індуктивність і ємність. Впливом індуктивності і ємності в ряді випадків можна знехтувати (наприклад, при низькій частоті струму) і представляти резистивний елемент на схемах у вигляді ідеального. Якщо впливом індуктивності знехтувати не можна, то резистивний елемент на схемі заміщення зображується у вигляді послідовно з'єднаних опорів і індуктивності.

Реальний індуктивний елемент має, окрім індуктивності, опір, яким, як правило, знехтувати не можна. Іноді треба враховувати і вплив ємності.

В реальному ємнісному елементі існують деякі втрати енергії. Тому ємнісний елемент необхідно зображати на схемах заміщення у вигляді паралельного з'єднання ємності C з провідністю g . Так як втрати енергії частіше всього відносно невеликі, то звичайним є зображення елемента у вигляді ідеального ємнісного елемента.

Закони Ома і Кірхгофа в комплексній формі

а) **Закон Ома:** $i = \frac{\dot{U}}{z}$.

б) **Перший закон Кірхгофа.** Алгебраїчна сума комплексних значень струмів у вузлі дорівнює нулю: $\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0$.

(Або: векторна (геометрична) сума струмів у вузлі дорівнює нулю: $\sum_{k=1}^n \vec{I}_k = 0$).

Комплексні значення струмів, для яких додатні напрямки обрані до вузла, записуються із знаком “+”.

Перший закон Кірхгофа можна застосовувати до *миттєвих значень струмів*:

алгебраїчна сума миттєвих значень струмів у вузлі електричного кола в кожен момент часу дорівнює нулю: $\sum_{k=1}^n i_k = 0$.

в) **Другий закон Кірхгофа**

Або: алгебраїчна сума комплексних значень напруг на всіх пасивних елементах (резистивних, індуктивних, ємнісних) будь-якого замкненого контуру електричного кола синусоїдального струму дорівнює алгебраїчній сумі комплексних значень всіх ЕРС цього ж контуру: $\sum_{k=1}^n \dot{U}_k = \sum_{k=1}^m \dot{E}_k$.

Другий закон Кірхгофа можна застосовувати і для миттєвих значень напруг і ЕРС: алгебраїчна сума миттєвих значень напруг на всіх пасивних елементах будь-якого замкненого контуру дорівнює алгебраїчній сумі всіх ЕРС цього ж контуру $\sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=1}^m e_k$.

Елементарні кола змінного струму з ідеальними елементами – резистором, котушкою індуктивності та конденсатором.

Співвідношення між струмом і напругою

а) Для кола синусоїдального струму, що містить лише ємнісний елемент, закон Ома:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_C}{-jX_C},$$

де $(-jX_C)$ - комплексний ємнісний опір конденсатора, \dot{U} - напруга на ньому.

Звідси $\dot{U}_C = (-jX_C)\dot{I}$.

Так як множення будь-якого вектора на символ $(-j)$ повертає цей вектор на 90° за годинниковою стрілкою, то звідси маємо, що *на конденсаторі напруга відстає за фазою від струму на 90° .*

б) Для кола тільки з індуктивним елементом закон Ома:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_L}{jX_L},$$

де jX_L - комплексний індуктивний опір.

Звідси напруга на котушці індуктивності $\dot{U}_L = jX_L\dot{I}$. Множення будь-якого вектора на символ j повертає цей вектор на 90° проти ходу годинникової стрілки, тому робимо висновок, що *напруга на індуктивності випереджає струм за фазою на 90° .*

в) Для кола, що містить тільки резистивний елемент, закон Ома має вигляд $\dot{I} = \frac{\dot{U}_R}{R}$.

На резисторі зсув фаз між напругою і струмом дорівнює нулю.

Деякі відомості про комплексні числа

Комплексним числом називається вираз $z = a + ib$, де i – уявна одиниця, яка визначається рівністю $i = \sqrt{-1}$, $i^2 = -1$; a, b - дійсні числа; a називається дійсною частиною комплексного числа z , b називається уявною частиною комплексного числа z .

Дії над комплексними числами:

а) додавання: $z = z_1 + z_2 = (a_1 + ib_1) + (a_2 + ib_2) = (a_1 + a_2) + i(b_1 + b_2) = a + ib$;

б) віднімання: $z = z_1 - z_2 = (a_1 + ib_1) - (a_2 + ib_2) = (a_1 - a_2) + i(b_1 - b_2) = a + ib$;

в) множення: $z = z_1 \cdot z_2 = (a_1 + ib_1) \cdot (a_2 + ib_2) = (a_1 \cdot a_2 - b_1 b_2) + i(a_1 b_2 + a_2 b_1) = a + ib$;

г) ділення: $z = \frac{a_1 + ib_1}{a_2 + ib_2}$.

Для виконання ділення множимо чисельник і знаменник на комплексно спряжену величину:

$$z = \frac{a_1 + ib_1}{a_2 + ib_2} \cdot \frac{a_2 - ib_2}{a_2 - ib_2} = \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2 + i(a_2 b_1 - b_2 a_1)}{a_2^2 + b_2^2} = \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2} + i \frac{(a_2 b_1 - b_2 a_1)}{a_2^2 + b_2^2} = a + ib.$$

Способи зображення синусоїдальних величин

Існують методи зображення синусоїдальних величин у вигляді:

а) тригонометричних функцій ;

б) графіків зміни функцій у часі (рис.14);

в) векторів, що обертаються в декартовій площині;

г) комплексних чисел.

Способи **а)** і **б)** вже застосовувалися вище (див. формулу (23) рис. 14).

в) Розглянемо векторний спосіб зображення синусоїдальних величин. Застосування векторних діаграм при розрахунку та дослідженні кіл змінного струму дозволяє наочно представляти процеси у колі та спростувати розрахунки.

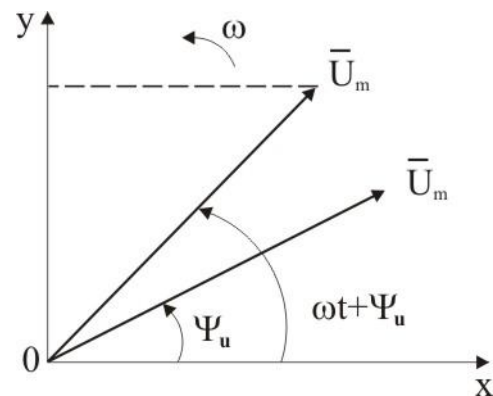


Рис. 16

Для зображення синусоїдальної величини $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ з початковою фазою ψ_u обертовим вектором побудуємо в декартовій системі координат xu під кутом ψ_u до позитивної осі абсцис вектор \vec{U}_m , довжина якого в довільно обраному масштабі дорівнює амплітуді гармонічної величини, яку зображаємо (рис.16). Додатні кути відкладаємо в напрямку проти обертання часової стрілки, а від'ємні – за часовою стрілкою.

Припустимо, що вектор \vec{U}_m , починаючи з моменту часу $t = 0$ обертається навколо початку координат проти годинникової стрілки зі сталою частотою обертання ω . В момент часу t вектор \vec{U}_m повернеться на кут ωt і буде розташований під кутом $(\omega t + \psi_u)$ по відношенню до осі абсцис. Проекція цього вектора на вісь ординат у вибраному масштабі дорівнює миттєвому значенню напруги: $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$.

Отже, величину, що змінюється гармонічно у часі, можна зображати обертовим вектором. При нульовому значенні початкової фази ($\psi_u = 0$) в момент часу $t = 0$ маємо $u = 0$ і вектор \vec{U}_m повинен бути розташований на осі абсцис.

Приклад.

При розрахунку кола змінного струму часто приходиться складати ЕРС, струми або напруги однієї і тієї ж частоти.

Припустимо, що треба скласти дві ЕРС:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{1e}) \quad \text{і} \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_{2e}).$$

Таке додавання можна здійснити аналітично або графічно. Останній спосіб більш є наочним і простішим. Дві ЕРС e_1 і e_2 , що складаються, зображені в певному масштабі векторами \vec{E}_{1m} і \vec{E}_{2m} (рис.4). При обертанні цих векторів з однією і тією ж частотою взаємне розташування векторів залишається незмінним. Сума проєкцій обертових векторів \vec{E}_{1m} і \vec{E}_{2m} на вісь ординат дорівнює проєкції на ту ж вісь вектора \vec{E}_m , який є їх геометричною сумою.

Отже, при додаванні двох синусоїдальних ЕРС однієї і тієї ж частоти одержуємо синусоїдальну ЕРС тієї ж частоти, амплітуда якої зображується вектором \vec{E}_m , що дорівнює геометричній сумі векторів \vec{E}_{1m} і \vec{E}_{2m} :

$$\vec{E}_m = \vec{E}_{1m} + \vec{E}_{2m}.$$

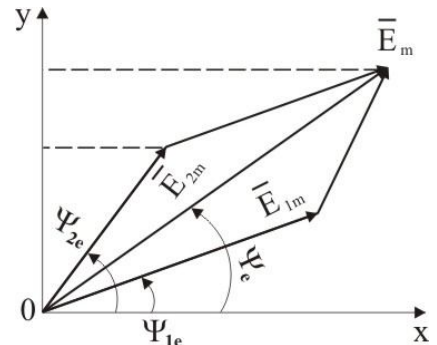


Рис.17

г) Розглянемо зображення синусоїдальних величин у вигляді комплексних чисел.

Метод аналізу кіл синусоїдального струму, коли всі його величини зображені у комплексному вигляді, називається *символічним*. Символічний метод дає змогу геометричні дії над векторами замінити алгебраїчними.

Символічний метод полягає в наступному:

- вектор будь-якої величини розглядається як величина комплексна на комплексній площині (тому метод має також назву “метод комплексних величин”);

- кожний вектор \dot{I} розкладається на складові I' та I'' по осям комплексної площини (рис.5).

Вісь абсцис називають віссю дійсних значень та позначають “+1”. Вісь ординат називають віссю уявних значень і позначають “+j”, де символ j – уявна одиниця ($j = \sqrt{-1}$). Складову вектора за уявною віссю виділяють символом j .

Діючі значення величин у комплексній формі записуються основним літерним позначенням, над яким ставлять крапку.

Будь-якому вектору на комплексній площині однозначно відповідає комплексне число, яке може бути записане в алгебраїчній, тригонометричній та показовій формі (експоненціальній) формах:

Алгебраїчна форма: $\dot{I} = I' + jI''$.

Тригонометрична: $\dot{I} = I \cos \psi + jI \sin \psi = I(\cos \psi + j \sin \psi)$.

Експоненціальна: $\dot{I} = I \cdot e^{j\psi}$.

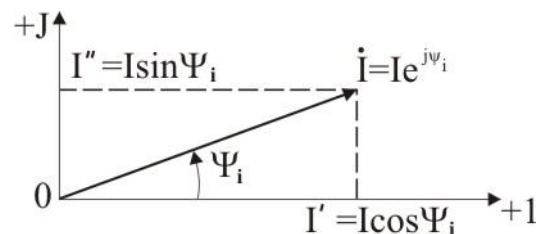


Рис.18

Остання формула записана з застосуванням формули Ейлера у попередній формулі: $e^{j\psi} = \cos\psi + j\sin\psi$.

Перехід від алгебраїчної форми запису до показової та тригонометричної відбувається за формулами:

$$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2}, \quad \psi_i = \arctg \frac{I''}{I'} \quad \text{при } I' > 0, \quad \psi_i = \arctg \frac{I''}{I'} + 180^\circ \quad \text{при } I' < 0.$$

Приклад 1. Електричний сигнал $u(t)$ заданий в тригонометричній формі:

$$u(t) = 10\sin(\omega t + \frac{\pi}{4})B.$$

Зобразити його в показниковій та алгебраїчній формах.

Розв'язання

В загальному вигляді формула сигналу має вигляд: $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$.

Діюче значення напруги визначається через її амплітудне значення: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

Виходячи з цього зображення діючого значення сигналу в показовій формі має вигляд:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\psi_u} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\psi_u} = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{j45^\circ} B;$$

в алгебраїчній:

$$\dot{U} = \frac{10}{\sqrt{2}} (\cos \frac{\pi}{4} + j \sin \frac{\pi}{4}) = (5 + j5)B.$$

Приклад 2. Напруга задається в комплексній формі: $\dot{U} = (6 - j8)B$.

Зобразити її в тригонометричній формі.

Розв'язання

Модуль діючого значення визначається за формулою:

$$U = \sqrt{6^2 + 8^2} = \sqrt{100} = 10B;$$

$$\text{аргумент: } \psi = \arctg \frac{U''}{U'} = \arctg(-\frac{8}{6}) = -53^\circ.$$

Оскільки напрямок кута повороту прийнято приймати за позитивний, якщо вектор обертається проти годинникової стрілки, то кут -53° – кут, визначений за напрямком годинникової стрілки.

Приклад 3.

Обчислити $u(t) = u_1(t) + u_2(t)$, де $u_1(t) = 100\sin(\omega t + \frac{\pi}{3})B$ і $u_2(t) = 50\sin(\omega t + \frac{\pi}{6})B$.

Розв'язання

Виражені у комплексній формі амплітудні значення напруг мають вигляд:

$$\dot{U}_{m1} = 100e^{j\frac{\pi}{3}} B; \quad \dot{U}_{m2} = 50e^{j\frac{\pi}{6}} B.$$

Для знаходження векторної суми знайдемо спочатку комплексні амплітуди в алгебраїчній формі:

$$\dot{U}_{m1} = 100\left(\cos\frac{\pi}{3} + j\sin\frac{\pi}{3}\right) = (50 + j86,6)B;$$

$$\dot{U}_{m2} = 50\left(\cos\frac{\pi}{6} + j\sin\frac{\pi}{6}\right) = (43,3 + j25)B.$$

Комплексна амплітуда сумарного сигналу:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{m1} + \dot{U}_{m2} = (50 + j86,6) + (43,3 + j25) = (93,3 + j111,6) = \sqrt{93,3^2 + 111,6^2} \cdot e^{j\arctg\left(\frac{111,6}{93,3}\right)} = 145e^{j50^\circ} B$$

Переходячи до синусоїдальної форми запису, маємо:
 $u(t) = 145\sin(\omega t + 50^\circ) B.$

На рис.19 приведена векторна діаграма, яка пояснює комплексну форму знаходження суми напруг.

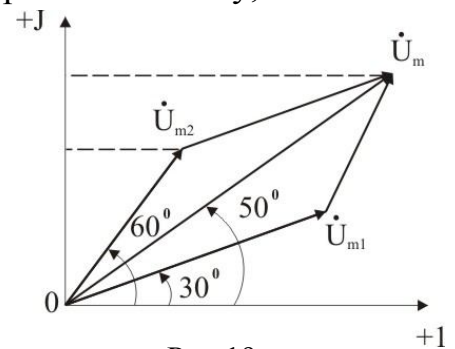


Рис.19

Література:

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник.-3-є вид. – К.: Каравела, 2009 – 296с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983
4. Титаренко М.В. Електротехніка: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних (неелектротехнічних) спеціальностей вузів. – К.:Кондор, 2009 – 240с.

Контрольні питання:

1. Дати визначення синусоїдального струму та навести його основні параметри.
2. Обґрунтувати необхідність застосування діючих, середніх та миттєвих значень параметрів змінного струму.
3. Навести форми представлення однофазного синусоїдального струму.
4. Зобразити схемне зображення котушки індуктивності та конденсатора. Визначити одиниці вимірювання ємності та

індуктивності.

5. Записати та проаналізувати наявність фазових співвідношень між струмом і напругою для ємності.
6. Записати та проаналізувати наявність фазових співвідношень між струмом і напругою для індуктивності.
7. Записати закон Ома в символічному вигляді для резистивного, ємнісного та індуктивного елементів.
8. Сформулювати закони Кірхгофа для кіл змінного струму.
9. Пояснити на прикладах застосування законів Ома та Кірхгофа при аналізі кіл змінного струму.
10. Навести вирази для підрахунку активного, реактивного ємнісного, реактивного індуктивного та реактивного повного опорів.

Питання для самостійної роботи:

1. Назвати галузі застосування синусоїдального струму та визначити його переваги перед постійним струмом.
2. Дії над комплексними числами.

Лекція № 4

Елементарні кола змінного струму з послідовно і паралельно з'єднаними елементами R, L, C.

План

1. Електричні кола змінного струму з послідовно з'єднаними ідеальними елементами R, L, C .
2. Векторна діаграма напруг. Співвідношення між струмом і напругою. Трикутник напруг, опорів. Резонанс напруг.
3. Електричні кола з паралельно з'єднаними елементами R, L, C . Співвідношення між струмом та напругою. Векторна діаграма струмів. Резонанс струмів. Трикутники струмів та провідностей.
4. Потужність в колі змінного струму.

Елементарні кола змінного струму з послідовно з'єднаними ідеальними елементами – резистором, конденсатором, котушкою індуктивності

Розглянемо електричне коло (рис.20), яке містить у собі послідовно з'єднані активний опір R , індуктивність L та ємність C , що живляться від ідеального джерела синусоїдального струму

$$i(t) = I_m \sin \omega t. \quad (24)$$

Поставимо перед собою задачу визначити напругу на кожному елементі та напругу U , яка може бути виміряною на клеммах джерела струму.

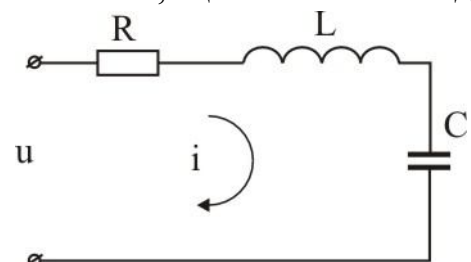


Рис. 20

Відповідно до другого закону Кірхгофа, для миттєвих значень напруг маємо:

$$u = u_R + u_L + u_C, \quad (25)$$

де $u_R = iR$ - миттєве значення напруги на резисторі; $u_L = L \frac{di}{dt}$ - миттєве значення напруги на котушці індуктивності; $u_C = \frac{1}{C} \int idt$ - напруга на конденсаторі.

Підставивши формулу (24) в (25), одержимо:

$$u = RI_m \cdot \sin \omega t + \omega L \cdot I_m \cos \omega t - \frac{1}{\omega C} I_m \cdot \cos \omega t,$$

де $\omega L = X_L$ та $\frac{1}{\omega C} = X_C$ - чисельні значення реактивних опорів котушки індуктивності і конденсатора відповідно, а величина $X_L - X_C = X$ називається реактивним опором схеми. Внаслідок цього маємо

$$u = I_m (R \sin \omega t + X \cos \omega t). \quad (26)$$

Використовуючи математичну формулу

$$a \sin \omega t + b \cos \omega t = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad \text{де } \varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{a},$$

перепишемо формулу (26) у вигляді

$$u = I_m \cdot \sqrt{R^2 + X^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = I_m \cdot z \cdot \sin(\omega t + \varphi),$$

де $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$ - зсув фаз між напругою на вході схеми і струмом; z - чисельне значення повного опору схеми.

Напругу на затискачах джерела струму можна також знайти, використовуючи другий закон Кірхгофа у комплексному вигляді, тобто

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (27)$$

Враховуючи, що через кожен з елементів протікає один і той же струм, можемо записати

$$\dot{U}_R = iR, \quad \dot{U}_L = j\omega L i, \quad \dot{U}_C = -\frac{1}{j\omega C} i,$$

$$\text{або } \dot{U}_R = iR, \quad \dot{U}_L = jX_L i, \quad \dot{U}_C = -jX_C i.$$

Це дає можливість рівняння (27) записати у вигляді:

$$\dot{U} = i(R + jX_L - jX_C) = i(R + jX) = i \underline{z}. \quad (28)$$

Величина $\underline{z} = R + j(X_L - X_C)$ є еквівалентним комплексним повним опором схеми, а реактивний опір ($X_L - X_C = X$) є уявною частиною комплексного опору кола. Комплексний повний опір схеми, як будь-яка комплексна величина, може бути представленою у вигляді: $\underline{z} = z \cdot e^{j\varphi}$, де z - модуль опору,

φ - зсув фаз між напругою на вході кола та струмом. Реактивний опір в залежності від величини X_L і X_C може носити індуктивний ($X_L > X_C$), або ємнісний характер ($X_L < X_C$).

З формули (28) маємо класичний закон Ома для нерозгалуженого кола змінного струму в комплексному вигляді: $\underline{i} = \frac{\underline{U}}{\underline{z}}$.

Такий же вигляд буде мати закон Ома для діючих значень струму і напруги: $I = \frac{U}{z}$.

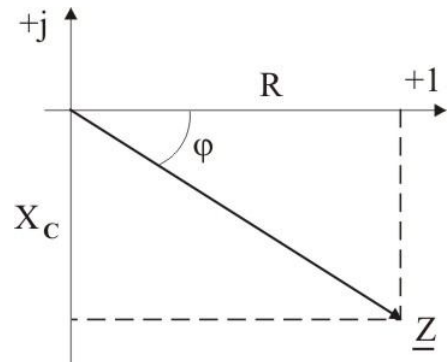


Рис. 21

Приклад 1.

Маємо коло з двох елементів R і C . Визначити модуль повного опору кола z .

Комплексний опір кола $\underline{z} = R - jX_C$, зсув фаз між напругою на схемі і струмом $\varphi = \arctg \frac{X_C}{R}$. Комплексний опір можна показати на комплексній площині (рис. 21).

З рисунку видно, що

$$R = z \cdot \cos \varphi$$

$$X_C = z \cdot \sin \varphi$$

$$z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Приклад 2.

Електричне коло змінного струму складається з послідовно з'єднаних резистора та котушки індуктивності (рис.22): $R = 25 \text{ Ом}$, $L = 0,1 \text{ Гн}$. Визначити діюче значення струму, якщо діюче значення напруги, прикладеної до кола, дорівнює 220В.

Розв'язання

Задачу можна розв'язувати або в комплексному вигляді, або в алгебраїчному для діючих величин. Застосуємо другий метод.

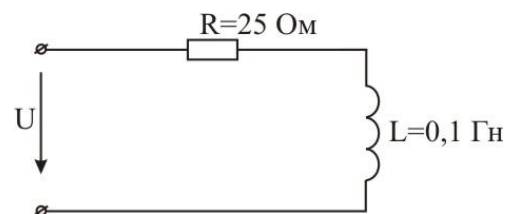


Рис.22

Реактивний опір котушки індуктивності:

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,1 = 31,4 \text{ Ом.}$$

Повний опір кола:

$$z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{625 + (31,4)^2} = 40,1 \text{ Ом.}$$

Зсув фаз між напругою на вході кола і струмом через елементи (рис.23): $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} = \arctg \frac{31,4}{25} = 51,5^\circ$.

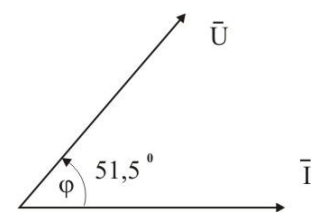


Рис.23

Діюче значення струму: $I = \frac{U}{z} = \frac{220}{40,1} = 5,48A$.

Побудова векторних діаграм для кола з послідовно з'єднаними елементами

Векторні діаграми для діючих значень величин будуюмо згідно з другим законом Кірхгофа, записаним у векторній формі: вектор напруги, прикладеної до кола, дорівнює геометричній сумі векторів напруг на окремих її ділянках

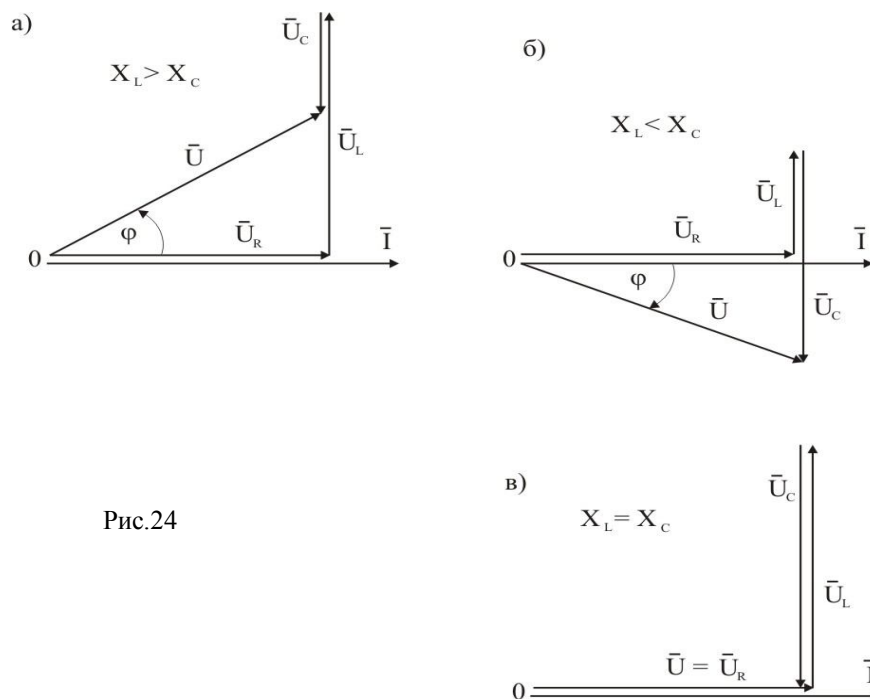
$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C,$$

де \vec{U} - напруга прикладена до кола.

Векторні діаграми будуюмо для трьох випадків:

а) $X_L > X_C$; б) $X_L < X_C$; в) $X_L = X_C$. Причому будемо вважати, що початкова фаза струму $\psi_i = 0$.

а) Розглянемо перший випадок: $X_L > X_C$; звідси за величиною $U_L > U_C$. Векторна діаграма для цього випадку наведена на рис.24,а.



На ній вздовж дійсної осі в обраному масштабі відкладений вектор струму \vec{I} . Потім паралельно до \vec{I} відкладаємо у масштабі вектор напруги на резисторі $\vec{U}_R = \vec{I}R$. Так як на котушці індуктивності напруга випереджає струм за фазою на 90^0 , то вектор $\vec{U}_L = \vec{I}X_L$ повертаємо відносно вектора \vec{I} на 90^0 проти годинникової стрілки і прикладаємо його до кінця вектора \vec{U}_R . Вектор $\vec{U}_C = \vec{I}X_C$ - вектор напруги на конденсаторі, який відстає від вектора струму на кут 90^0 , тому обертаємо його за годинниковою стрілкою на 90^0 і прикладаємо до кінця попереднього вектора, \vec{U}_L .

Кут зсуву φ між векторами \vec{U} та \vec{I} при $X_L > X_C$ є додатним і коло має індуктивний характер.

б) Випадок $X_L < X_C$; звідси за величиною $U_L < U_C$.

Векторна діаграма приведена на рис.24,б. При $X_L < X_C$ зсув фаз між векторами \vec{U} та \vec{I} є від'ємним і коло має ємнісний характер.

в) При $X_L = X_C$ маємо особливий режим (рис.24,в): так як вектори \vec{U}_L і \vec{U}_C рівні за величиною, але протилежно направлені (тобто знаходяться в протифазі), тому їх геометрична сума дорівнює нулю. Такий режим називається **резонансом напруг**.

Як видно з векторної діаграми, при резонансі напруг напруга на вході кола \vec{U} чисельно дорівнює падінню напруги на активному опорі R , а зсув фаз між векторами \vec{U} та \vec{I} дорівнює нулю. Якщо активний опір R малий, то виникає значний струм (рис. 25) та великі напруги на ємності та індуктивності, що можуть бути значно більшими, ніж напруга мережі.

Частоту змінного струму ω_0 , при якій виникає резонанс, називають **резонансною**. Її визначають з умови рівності реактивних опорів:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad \text{звідки } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Відношення напруги \dot{U}_L і \dot{U}_C до напруги \dot{U}_R називається **добротністю** і позначається літерою Q :

$$Q = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}_R} = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}_R} = \frac{jX_L}{R} = -\frac{jX_C}{R}.$$

Добротність визначає, у скільки разів напруга на реактивних елементах перевищує напругу на резистивному елементі.

Оскільки резонансна частота дорівнює $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то добротність $Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R}$, де ρ - хвильовий опір. Хвильовим опором називають величину реактивного опору при резонансній частоті: $\rho = \omega_0 L = \frac{L}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

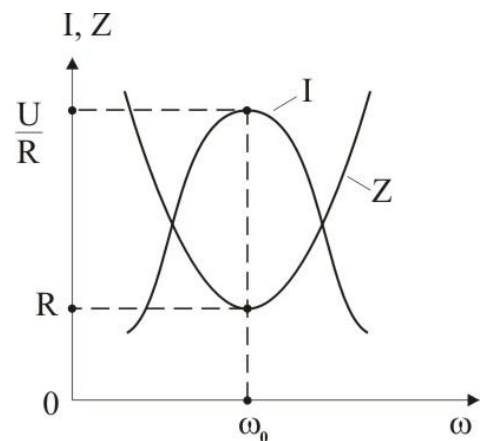


Рис. 25

Явище резонансу широко використовують в радіотехніці, телебаченні, автоматичі та інших технічних галузях. Але у промисловості резонансні явища пов'язані зі значними підвищеннями напруги на індуктивних та ємнісних елементах, що може привести до пробую їх ізоляції.

Трикутник напруг і опорів

а) Трикутник напруг

Аналіз векторних діаграм (рис. 24) показує, що вектор прикладеної до кола напруги можна розглядати як геометричну суму векторів $\vec{U}_a = R\vec{I}$ і $\vec{U}_p = jX\vec{I}$. Вектор \vec{U}_a (вектор результуючої напруги на активних елементах кола) співпадає за фазою з вектором струму \vec{I} , а вектор \vec{U}_p (вектор результуючої напруги на реактивних елементах кола) перпендикулярний вектору \vec{I} і повернутий вліво від нього, якщо $\varphi > 0$ - тобто коло має індуктивний характер, або вправо від нього, якщо $\varphi < 0$ (тобто коло має ємнісний характер).

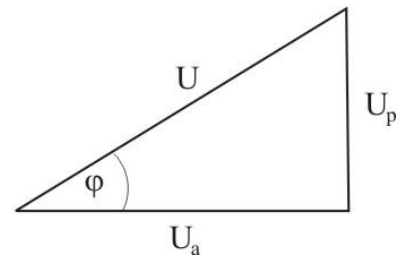


Рис.26

В одержаному трикутнику напруг \vec{U}_a (рис.26) співпадає за фазою зі струмом і називається *активною складовою напруги*: $\vec{U}_a = U \cos \varphi = RI$.

Напруга \vec{U}_p зсунута за фазою на кут $\pi/2$ відносно струму і називається *реактивною складовою напруги*: $\vec{U}_p = U \sin \varphi = XI$.

Виходячи с трикутника (рис.26) напруга на затискачах кола $U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$.

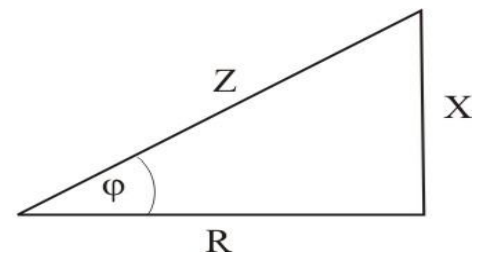


Рис.27

б) *Трикутник опорів* одержуємо з трикутника напруг.

Довжини сторін трикутника опорів визначаються шляхом ділення відповідних напруг на значення струму (рис.27).

З трикутника опорів знаходимо співвідношення:

$$\cos \varphi = R/z; \quad \sin \varphi = X/z; \quad \operatorname{tg} \varphi = X/R, \\ Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Електричне коло з паралельним з'єднанням елементів

При паралельному з'єднанні елементів (рис.28) рівняння за першим законом Кірхгофа для миттєвих значень та у комплексній формі мають такий вигляд:

$$i = i_R + i_L + i_C, \quad \dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C. \quad (29)$$

Через провідності

- g – активну,
- b_L – реактивну індуктивну,

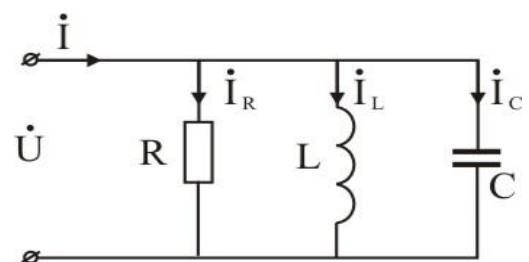


Рис.28

- b_C - реактивну ємнісну струми можна записати у комплексному вигляді:

$$\dot{I}_R = g\dot{U}, \quad \dot{I}_L = -jb_L\dot{U}, \quad \dot{I}_C = jb_C\dot{U},$$

де \dot{U} - комплексне діюче значення напруги на вході кола; $(-jb_L)$ – комплексне значення індуктивної провідності; (jb_C) – комплексне значення ємнісної провідності.

Тому рівняння (29) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= g\dot{U} - jb_L\dot{U} + jb_C\dot{U} \\ \dot{I} &= (g - jb_L + jb_C)\dot{U}. \end{aligned} \quad (30)$$

Різниця $b = b_L - b_C$ називається *реактивною провідністю*, а величина $\underline{y} = g - jb$ - *комплексною провідністю* кола (де $b > 0$ при $b_L > b_C$, $b < 0$ при $b_L < b_C$).

Звідси закон Ома в комплексному вигляді для розгалуженого кола:

$$\dot{I} = \underline{y}\dot{U}.$$

Побудова векторних діаграм для кола з паралельно з'єднаними елементами

Векторні діаграми для діючих значень величин будуюмо згідно з першим законом Кірхгофа, записаним у векторній формі: $\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_L + \vec{I}_C$, враховуючи зсув фаз φ між напругою і струмом і вважаючи, що початкова фаза напруги дорівнює нулю ($\psi_u = 0$).

Векторні діаграми будуюмо для трьох випадків:

а) $b_L > b_C$ (рис.29,а); б) $b_L < b_C$ (рис.29, б); в) $b_L = b_C$ (рис.29,в).

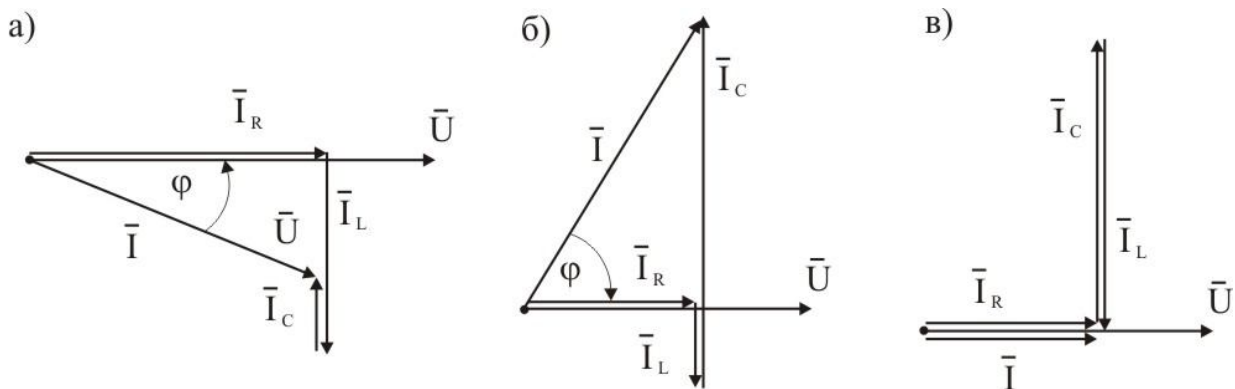


Рис. 29

Резонанс струмів спостерігається в розгалужених колах при умові $b_L = b_C$ (рис.29,в). У цьому разі струми у гілках з реактивними елементами рівні і повернені в протилежні боки. Струми у гілках з реактивними елементами можуть значно перевищувати струм у нерозгалуженій ділянці кола, який в момент резонансу набуває мінімального значення (рис.30). Повна провідність кола дорівнює тільки активній провідності ($y=g$).

Як і при резонансі напруг, при резонансі струмів мають місце співвідношення: $\varphi = 0$, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

Так як напруга на всіх елементах при паралельному з'єднанні однакова, то резонанс струмів не представляє небезпеку. Тому він широко використовується в енергетиці, радіотехніці, телебаченні, техніці зв'язку.

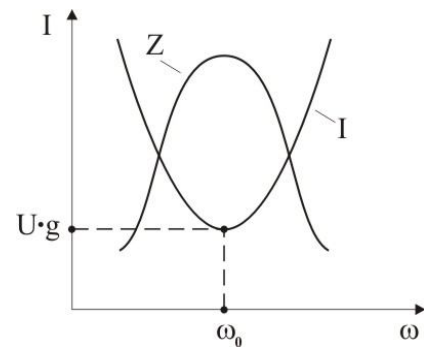


Рис.30

Трикутники струмів і провідності

а) **Трикутник струмів.** Аналіз векторних діаграм (рис.29,а і б) показує, що вектор струму \vec{I} на нерозгалуженій ділянці кола можна розглядати як векторну (геометричну) суму векторів \vec{I}_a і \vec{I}_p . В одержаному трикутнику струмів (рис.31) вектор \vec{I}_a (вектор струму через активні елементи кола) співпадає за фазою з вектором напруги \vec{U} , а вектор \vec{I}_p (вектор результуючого струму через реактивні елементи кола) перпендикулярний вектору \vec{U} .

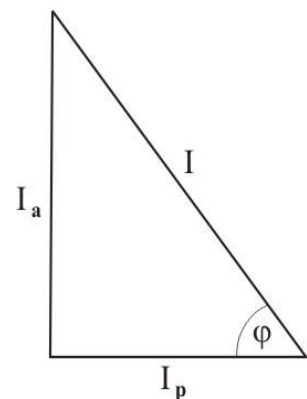


Рис.31

З трикутника струмів діюче значення струму $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, де $I_a = Ug$, $I_p = Ub$.

б) **Трикутник провідностей.** Розділивши кожен із сторін трикутника струмів (рис.29, а або б) на діюче значення напруги U , одержимо **трикутник провідності** (рис.32), подібний трикутнику струмів. Активна та реактивна провідності зображені катетами, а повна провідність – гіпотенузою прямокутного трикутника.

Для трикутника провідності мають місце співвідношення

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad g = y \cos \varphi, \quad b = y \sin \varphi, \quad \varphi = \arccos(g/y).$$

Розглянуті в лекції трикутники струмів та напруг є векторними, а трикутники опорів і провідностей – звичайними трикутниками.

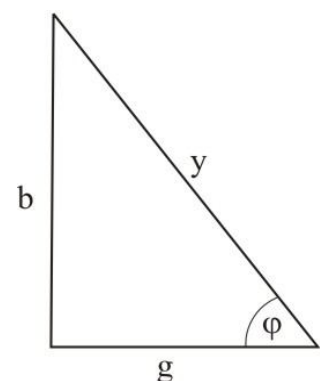


Рис.32

Кут φ (зсув фаз між струмом і напругою) однаковий у трикутниках опору та провідності, тобто ці трикутники подібні. За визначенням $y = 1/z$, тому можна скласти співвідношення між опором та провідностями $R/z = g/y$ та інші.

Вирази провідностей через опори та опорів через провідність мають вигляд:

$$\begin{aligned} y &= 1/z, & z &= 1/y, \\ g &= r/z^2, & R &= g/y^2, \\ b &= X/z^2, & X &= b/y^2. \end{aligned}$$

Потужність в колах змінного струму: активна, реактивна і повна потужності. Трикутник потужності

Повна потужність кола змінного струму є величиною комплексною і визначається добутком комплексного значення напруги та спряженого комплексного значення струму $\tilde{S} = \dot{U} I^*$ і може бути представленою в алгебраїчній і тригонометричній формах у вигляді дійсної і уявної частин:

$$\tilde{S} = P + jQ, \quad \tilde{S} = S \cos \varphi + jS \sin \varphi,$$

де P – активна потужність (одиниця вимірювання – Вт); Q – реактивна потужність – потужність (одиниця вимірювання Вар); S – модуль повної потужності (одиниця вимірювання - В·А), який визначається за формулою:

$$S = UI.$$

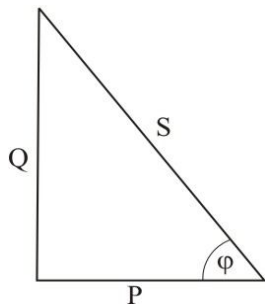


Рис.33

Якщо трикутник напруг (рис.26) помножити на струм I , то отримуємо подібний *трикутник потужностей* (рис.33).

Трикутник потужностей дає наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} P &= S \cos \varphi; & Q &= S \sin \varphi; & \varphi &= \arccos \frac{P}{S} \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}; \end{aligned}$$

Наведені потужності також можуть бути розраховані за діючим значенням струму і відповідного опору за формулами:

$$P = I^2 R, \quad Q = I^2 X, \quad S = I^2 Z.$$

Якщо є кілька приймачів електричної енергії, то співвідношення для повної потужності має вигляд:

$$S = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n P_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^m Q_{L_k} - \sum_{k=1}^l Q_{C_k} \right)^2}.$$

Коефіцієнт потужності. Засоби компенсації реактивної потужності

Активна потужність визначається співвідношенням $P = S \cos \varphi$, де величина $\cos \varphi$ називається *коефіцієнтом потужності* ($\cos \varphi = \frac{P}{S}$). *Коефіцієнт потужності характеризує ступінь використання електричної енергії.*

Більшість крупних споживачів електроенергії уявляють собою електромагнітні механізми, наприклад, двигуни, трансформатори, в яких змінний магнітний потік зв'язаний з обмотками. Внаслідок цього в обмотках при протіканні змінного струму індуються реактивні ЕРС, які обумовлюють зсув фаз φ між напругою і струмом. Цей зсув фаз звичайно збільшується, а $\cos \varphi$ зменшується при малому навантаженні. Наприклад, якщо $\cos \varphi$ двигунів змінного струму при повному навантаженні складає 0,75-0,8, то при малому навантаженні він зменшується до 0,2-0,4.

Якщо потужність P , яка споживається всіма приймачами в даних колах, є повністю визначеною, то при незмінній напрузі на затискачах приймачів їх струм обернено пропорційний до коефіцієнта потужності: $I = P/U \cos \varphi$. Із зменшенням $\cos \varphi$ струм навантаження електричної станції і підстанцій буде збільшуватися при одній і тій самій потужності, що віддається.

Разом з тим електричні генератори, трансформатори та електричні мережі розраховуються на певні значення напруги і струму. Тому, наприклад, при $\cos \varphi = 0,5$ і повному завантаженні струмом генераторів, трансформаторів і мереж потужність, яка передається приймачам, буде складати всього 50% від потужності, яка могла бути переданою при $\cos \varphi = 1$. Тобто буде мати місце неповне використання установленної потужності генераторів, трансформаторів, а також електричних мереж. Тому дуже важливим стає питання підвищення коефіцієнта потужності.

Баланс потужностей для кола змінного струму

Баланс потужності можна визначити рівнянням $\underline{S}_{дж} = \underline{S}_{прийм}$, де $\underline{S}_{дж}$ - потужність усіх джерел живлення,

$\underline{S}_{прийм}$ - потужність усіх приймачів кола, тобто

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_k I_k^* = \sum_{k=1}^m I_k^2 Z_k.$$

Треба пам'ятати, що добуток $\dot{U}_k I_k^*$ береться зі знаком “-“, коли напруга та струм джерела протилежні за напрямком. Якщо напруга на джерелі та струм через нього збігаються за напрямком, то добуток $\dot{U}_k I_k^*$ треба брати додатним.

Внутрішній опір джерела живлення (звичайно джерела струму) вважають звичайним приймачем електричної енергії.

Змішане з'єднання R, L, C елементів

Розглянемо змішане з'єднання елементів резисторів, котушок індуктивності і конденсаторів (рис.34) і знайдемо струми і падіння напруг на всіх елементах кола.

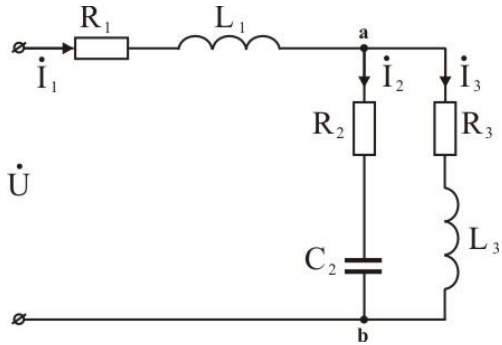


Рис.34

Перший закон Кірхгофа в комплексному вигляді для вузла "а" заданого кола: $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$;

Другий закон Кірхгофа для замкнутого кола:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_{ab},$$

де \dot{I}_1 - діюче значення струму в комплексному вигляді на нерозгалуженій ділянці кола,

\dot{U} - діюче значення напруги в

комплексному вигляді на вході схеми.

1. Для знаходження струмів і напруг складемо нову еквівалентну схему (рис.35) і визначимо повний опір кожної гілки:

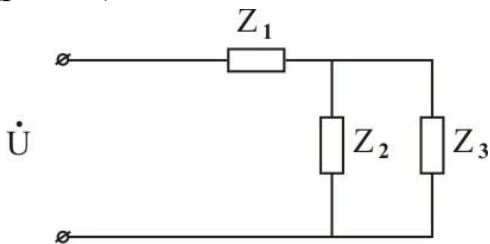


Рис.35

$$\underline{z}_1 = R_1 + j \cdot \omega L_1 \quad \underline{z}_2 = R_2 - j \frac{1}{\omega C_2};$$

$$\underline{z}_3 = R_3 + j \omega L_3.$$

Загальний опір паралельних гілок 2 і 3 в

комплексному вигляді: $\underline{z}_{2,3} = \frac{\underline{z}_2 \cdot \underline{z}_3}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3}$.

2. Спростимо схему (переходимо від рис.35 до рис.36): Виходячи з рис.36 повний опір схеми в комплексному вигляді:

$$\underline{z}_{екв} = \underline{z}_1 + \underline{z}_{2,3}.$$

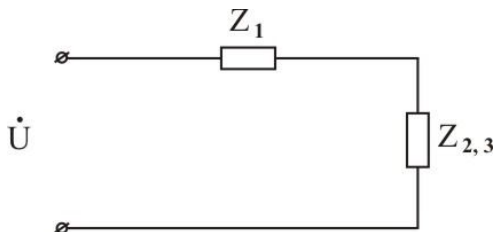


Рис.36

3. За законом Ома знаходимо струм на нерозгалуженій ділянці кола:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{z}_{екв}}.$$

4. Знаходимо напругу на ділянці ab: $\dot{U}_{ab} = \underline{z}_{23} \cdot \dot{I}_1$. Обчислення \dot{U}_{ab} дає можливість визначити струми в паралельних гілках:

$$i_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_2},$$

$$i_3 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_3}.$$

5. Знаходимо падіння напруги на всіх елементах:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{R_1} &= \dot{I}_1 R_1; & \dot{U}_{L_1} &= \dot{I}_1 \cdot X_{L_1}; \\ \dot{U}_{R_2} &= \dot{I}_2 R_2; & \dot{U}_{C_2} &= \dot{I}_2 X_{C_2}; \\ \dot{U}_{R_3} &= \dot{I}_3 R_3; & \dot{U}_{L_3} &= \dot{I}_3 X_{L_3}. \end{aligned}$$

6. Перевірку правильності обчислень проводимо за допомогою балансу потужностей.

Повну потужність, яку споживають споживачі з активним опором:

$$P_{\Sigma_{II}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3;$$

потужність, яку споживають всі споживачі з реактивним опором:

$$Q_{\Sigma_{II}} = I_1^2 X_{L_1} - I_2^2 X_{C_2} + I_3^2 X_{L_3}.$$

Чисельне значення повної потужності кола: $S_n = \sqrt{P_{\Sigma_A}^2 + Q_{\Sigma_P}^2}$.

Потужність може бути представленою у вигляді дійсної і уявної частин:

$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P_{II} + jQ_{II}$. І якщо $P_{\Sigma_A} = P_{дж}$, а $Q_{\Sigma_P} = Q_{дж}$, то баланс потужності для кола сходиться, а це підтверджує правильність розв'язання задачі.

Примітка: Якщо комплексне значення струму визначається за формулою $\dot{I} = 10 \cdot e^{j30^\circ} A$, то спряженою величиною буде комплексне значення струму $\dot{I} = 10 \cdot e^{-j30^\circ} A$.

Література:

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник.-3-є вид. – К.: Каравела, 2009 – 296с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983
4. Титаренко М.В. Електротехніка: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних (неелектротехнічних) спеціальностей вузів. – К.:Кондор, 2009 – 240с.

Контрольні питання:

1. Навести рівняння електричного стану для послідовного з'єднання R, L, C - елементів.

2. Пояснити принцип побудови векторних діаграм на прикладі схеми послідовного з'єднання резистора, конденсатора, котушки індуктивності.
3. Пояснити трикутник напруг.
4. Пояснити трикутник опорів.
5. Пояснити вираз для визначення повного опору схеми при послідовному з'єднанні елементів.
6. В чому полягає явище резонансу напруг? Визначити умову виникнення цього явища і записати формулу для визначення резонансної частоти.
7. Намалювати графік залежності струму і повного опору кола з послідовно з'єднаними елементами R , L , C , коефіцієнта потужності від частоти при резонансі напруг.
8. Визначити резонансну частоту при резонансі напруг.
9. Навести рівняння електричного стану для паралельного з'єднання R , L , C - елементів.
10. Навести вирази для підрахунку активної, реактивної та повної провідностей.
11. Пояснити принцип побудови векторних діаграм на прикладі схеми паралельного з'єднання резистора, конденсатора, котушки індуктивності.
12. В чому полягає резонанс струмів? Обґрунтуйте негативні та позитивні властивості резонансу струмів.
13. Проаналізувати умови виникнення резонансу напруг.
14. Намалювати графік залежності струму, повного опору, коефіцієнта потужності від частоти для паралельного з'єднання елементів R , L , C у випадку резонансу струмів.
15. Пояснити принцип побудови векторних діаграм на прикладі схеми послідовного з'єднання резистора, конденсатора, котушки індуктивності.
16. Трикутник струмів і провідностей.
17. Записати формули для підрахунку активної, реактивної та повної потужностей.
18. Зобразити трикутник потужностей та написати вирази на основі цього трикутника для визначення активної, реактивної та повної потужностей.
19. Навести рівняння для підрахунку балансу потужностей у колах змінного струму.

Питання для самостійної роботи:

1. Обґрунтувати економічну важливість коефіцієнта потужності.
2. Навести способи та засоби підвищення коефіцієнта потужності.
3. Змішане з'єднання R , L , C елементів.

Тема № 3. Електричні кола трифазного струму

Лекція № 5

Трифазні кола змінного струму

План

1. Галузі застосування трифазного змінного струму. Трифазний генератор. Система трьох ЕРС.
2. Види з'єднання фаз генератора та навантажень в трифазному колі. Види навантажень. Основні поняття в трифазному колі.
3. З'єднання фаз джерела й приймачів зіркою при симетричному і несиметричному навантаженні.
4. Роль нейтрального проводу. Векторні діаграми. Обрив лінійного проводу.
5. Співвідношення між фазною та лінійною напругами. Потужність трифазного кола. Засоби вимірювання активної потужності.

Галузі застосування трифазного змінного струму.

Найпростіший трифазний генератор. Система трьох ЕРС

Однофазні генератори змінної напруги, однофазні лінії електропередачі та однофазні двигуни є економічно не вигідними порівняно з такими самими трифазними. Тому в електроенергетиці сьогодні найбільше застосовуються трифазні системи (генератори, лінії електропередач, двигуни та інші приймачі).

Багатофазним називають електричне коло, в якому міститься m – джерел живлення, що працюють з однаковою частотою, але ЕРС яких зміщені за фазою одна відносно одної на кут $\varphi = 360^\circ/m$.

Трифазним електричним колом називають сукупність трьох електричних кіл з трьома синусоїдними ЕРС однакової амплітуди і частоти, що зсунуті між собою за фазою на 120° .

Фазами називають незалежні електричні кола з незалежними джерелами живлення, що об'єднуються в одну систему.

Фазами також називаються незалежні джерела живлення кожного кола, що об'єднуються.

Фазами ще називаються приймачі електричної енергії в кожному колі, що об'єднуються.

За визначенням трифазної системи миттєві значення фазних ЕРС є:

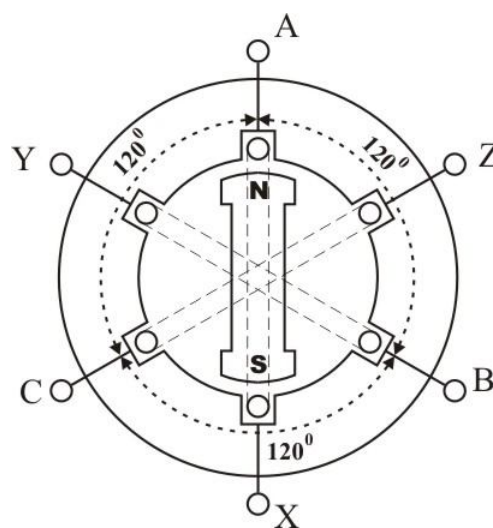


Рис. 37

$$e_A = E_m \sin \omega t,$$

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right),$$

де початкова фаза ЕРС e_A , $\varphi_A = 0$.

Три однакові за частотою і амплітудою, зсунуті за фазою на 120° ЕРС генеруються одним джерелом енергії - трифазним генератором. Трифазний генератор складається з статора (нерухомої частини генератора), ротора (обертової частини) (рис.37). В пазах статора розташовані три обмотки, осі яких зсунуті просторово одна відносно одної на кут 120° (буквами A, B, C позначені початки фазних обмоток генератора, а x, y, z – кінці). Ротор використовується для створення магнітного поля. В якості ротора застосовують магніт або електромагніт. Вал ротора зв'язаний з первинним двигуном, який обертає його. При обертанні ротора в фазних обмотках статора індукуються синусоїдальні фазні ЕРС (e_A, e_B, e_C).

На рис.38 приведені миттєві значення ЕРС трифазної системи e_A, e_B, e_C . Кожна ЕРС зсунута за фазою відносно двох інших на 120° . Порядок, в якому ЕРС проходять через однакові значення, називається *порядком чергування фаз*. Послідовність чергування фаз $A - B - C$ називається прямою послідовністю чергування фаз. Аналіз, розрахунок трифазних кіл буде проводитися для прямої послідовності.

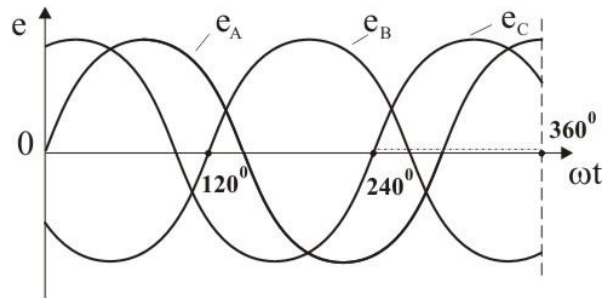


Рис. 38

З'єднання обмоток генератора зіркою і трикутником. Види з'єднання навантажень в трифазному колі

Існують два способи сполучення окремих фаз (обмоток) трифазного генератора – з'єднання зіркою (Υ) і трикутником (Δ). На рис.39 приведено з'єднання обмоток генератора зіркою, яке реалізується при з'єднанні виводів x, y, z в одну загальний вузол. Умовно додатний напрям ЕРС приймають від кінця обмотки до її початку (рис.39,б).

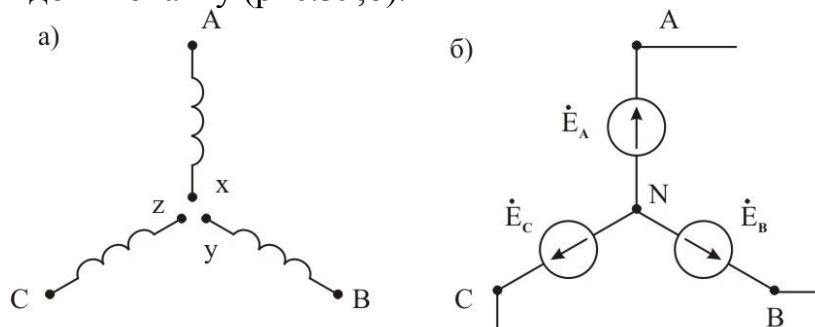


Рис. 39

Для з'єднання трикутник необхідно з'єднати x з B , y з C , z з A .
 Таким же чином можуть бути з'єднаними між собою споживачі.

Види навантаження в трифазному колі

1. Симетричне навантаження.
2. Несиметричне.

У випадку *симетричного навантаження* виконується умова: $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$.
 Так як $\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$, то рівність комплексних опорів означає і рівність модулів опорів ($Z_A = Z_B = Z_C$), і однаковий характер цих навантажень ($\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$).

При *несиметричному навантаженні* $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$. Тут можливі два випадки:

- а) випадок *рівномірного навантаження*, коли $Z_A = Z_B = Z_C$, але $\varphi_A \neq \varphi_B \neq \varphi_C$.
- б) випадок *однорідного навантаження*, коли $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$, але модулі опорів $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$.

З'єднання фаз джерела й приймача зіркою. Основні поняття

Розглянемо випадок, коли і обмотки генератора, і три споживача з'єднані за схемою зірка (рис.40). Всі кінці фазних обмоток з'єднані в загальний вузол N , який називається *нейтраллю генератора*. Такий же вузол n утворюють з'єднання трьох фаз споживача, який називають *нейтраллю споживача*. Точками a, b, c позначені фази приймачів (A, B, C – фази джерел).

Кожна фаза трифазного генератора повинна сполучатися з кожною фазою трифазного приймача двома проводами. Але для досягнення економії провідникових матеріалів і зменшення втрат енергії три зворотні проводи, що з'єднують приймачі з фазами генератора, “зливаються” в один провід, який називається *нейтральним (Nn)*. Таким чином, замість шостипровідної системи одержують чотирьохпровідну.

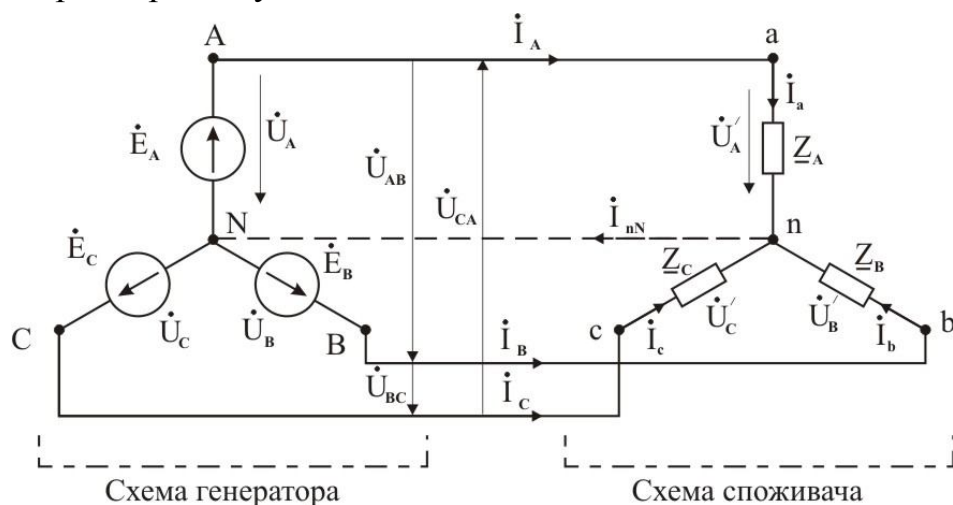


Рис. 40

Провід, що з'єднує фазу генератора з фазою споживача, називається **лінійним**, або **лінією** (проводи Aa, Bb, Cc); струм у лінійних проводах – **лінійним струмом** I_L (I_A, I_B, I_C). Напряга на затискачах фаз генератора (або споживача) називається **фазною напругою** \dot{U}_ϕ . Струм в обмотках фаз або фазних навантаженнях – це **фазний струм** I_ϕ (наприклад, I_a, I_b, I_c). Напряга між лінійними проводами – **лінійна напряга** \dot{U}_L ($\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CB}$).

З'єднання фаз джерела й приймача зіркою при різних видах навантаження

1) Випадок симетричного навантаження ($Z_A = Z_B = Z_C$) з нейтральним проводом:

а) лінійні струми дорівнюють фазним $I_L = I_\phi$ (тобто, $I_A = I_a; I_B = I_b; I_C = I_c$);

б) діючі значення фазних напруг на споживачах однакові між собою і дорівнюють діючим значенням фазних напруг генератора ($U_{\phi \text{ ген}} = U_{\phi \text{ сп}}$);

в) оскільки при симетричному навантаженні фазні напруги однакові і утворюють симетричну систему напруг, то струми у всіх трьох фазах будуть теж однаковими ($I_a = I_b = I_c$) й зсувеними на 120° між собою, тобто утворюють симетричну систему.

в) фазні струми знаходимо за законом Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}'_A}{Z_A}, \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}'_B}{Z_B}, \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}'_C}{Z_C},$$

де $Z_A = Z \cdot e^{j\varphi_a}$, $Z_B = Z \cdot e^{j\varphi_b}$, $Z_C = Z \cdot e^{j\varphi_c}$ - комплексні повні опори споживачів фази; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ - кути зсуву фаз між фазними напругами і фазними струмами на навантаженні, які визначаються із трикутників опорів відповідних фаз ($\cos\varphi_a = R_a / Z_a$, $\cos\varphi_b = R_b / Z_b$, $\cos\varphi_c = R_c / Z_c$).

г) при наявності нейтрального проводу nN перший закон Кірхгофа для вузла n :

$$\dot{I}_{nN} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_a (1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) = \dot{I}_a \cdot 0 = 0.$$

Із наведеної суми випливає, що при симетричному навантаженні внаслідок створення симетричної системи фазних (чи лінійних) струмів струм у нейтральному провіднику відсутній. Тому **при симетричному навантаженні нейтрального проводу не встановлюють**. Потенціали нейтралі генератора й нейтралі споживачів однакові ($\varphi_n = \varphi_N$), і на векторних діаграмах відповідні їм точки n і N розташовуються в одній точці (в центрі трикутника векторної діаграми лінійних напруг).

Таким чином, приймачі електричної енергії, що мають гарантоване симетричне навантаження, вмикають за **трипровідною схемою** (тобто без нульового проводу).

д) за другим законом Кірхгофа лінійні напруги визначають як геометричну різницю векторів (рис. 41):

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B;$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}\quad (31)$$

Знаходимо зв'язок між лінійними і фазними напругами шляхом переходу від дії над комплексними величинами до дії над векторами (рис.41), використовуючи, наприклад, перше рівняння.

У векторній діаграмі фазних напруг врахована рівність їх модулів та зсув фаз між ними на 120° ($\dot{U}_A = U \cdot e^{j0}$, $\dot{U}_B = U \cdot e^{-j120^\circ}$, $\dot{U}_C = U \cdot e^{j120^\circ}$).

З рис.41 знаходимо, що діюче значення лінійної напруги U_{AB} визначається через діюче значення фазної напруги U_A за формулою: $U_{AB} = \sqrt{3}U_A$.

Отже, зв'язок між лінійною і фазною напругами при з'єднанні трифазного генератора і приймачів за схемою зірка:

$$U_l = \sqrt{3}U_\phi.$$

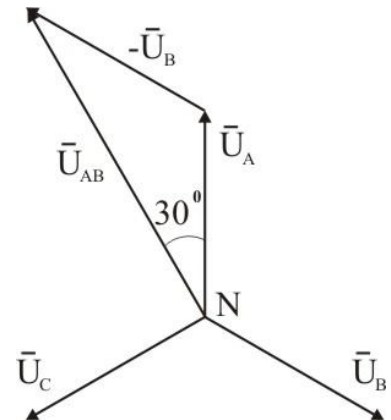


Рис. 41

2) Випадок *несиметричного навантаження* ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$)

а) випадок без нейтрального проводу

У випадку несиметричного навантаження фазні напруги на приймачі будуть різними ($\dot{U}'_A \neq \dot{U}'_B \neq \dot{U}'_C$) і між точками N і n виникає різниця потенціалів, яка визначається за формулою:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N},$$

де $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - комплексні значення фазних напруг генератора; $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a$, $\underline{Y}_b = 1/\underline{z}_b$, $\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c$ - провідності фаз споживача; $\underline{Y}_N = 1/\underline{Z}_N$ - провідність опору між точками N і n , якщо він є. Однак у нашому випадку (за відсутності нейтрального проводу) $\underline{Z}_N \rightarrow \infty$, а $\underline{Y}_N \rightarrow 0$. Тому $I_{nN} = 0$ та $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$.

Відповідно до другого закону Кірхгофа напруги на фазах несиметричного приймача в цьому режимі роботи визначаються так:

$$\begin{aligned}\dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}'_B &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN},\end{aligned}\quad (32)$$

де $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ - напруги на фазах споживача,

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - на фазах генератора.

Векторну діаграму несиметричної зірки будують так, як показано на рис. 42. Вектори

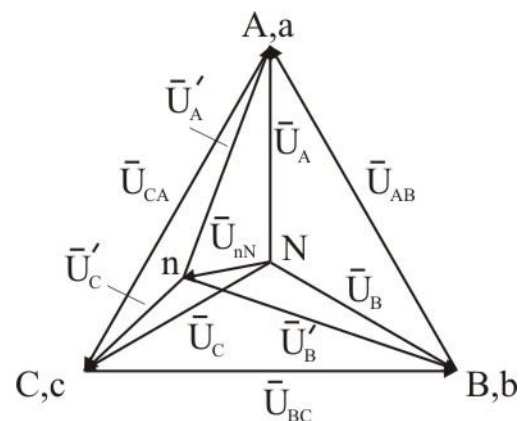


Рис. 42

фазних напруг генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ зсунуті на кут 120° . Точка N відповідає потенціалу нейтральної точки генератора, зручно потенціал точки N дорівнювати нулю. Лінійні напруги визначаються і будуються згідно з системою рівнянь (31), вектори фазних напруг приймача – згідно (32).

Фазні струми на навантаженні згідно з законом Ома :

$$i_a = \frac{\dot{U}'_A}{Z_A}, \quad i_b = \frac{\dot{U}'_B}{Z_B}, \quad i_c = \frac{\dot{U}'_C}{Z_C}.$$

Ступінь несиметрії фазних напруг залежить від ступеня несиметрії навантаження. Оскільки опори фаз можуть змінюватися в широких межах, то будуть сильно змінюватися за значенням й фазні напруги: на одних приймачах (фазах) напруга може стати значно більшою, а на інших значно меншою від номінальної фазної напруги, на яку розрахований приймач, а це неприпустимо.

Крім того, в такому режимі роботи (при несиметричному навантаженні і без нейтрального проводу) фази приймача стають неавтономними: це означає, що якщо змінювати опір однієї фази, то одночасно будуть змінюватися струми й напруги на всіх трьох фазах приймача.

Із всього сказаного випливає, **що робота несиметричного приймача, з'єднаного зіркою, без нульового провідника є аварійним режимом**, і для його уникнення необхідно застосовувати нейтральний провід.

в) випадок з нейтральним проводом

При присутності нейтрального проводу фазні напруги несиметричного приймача створюватимуть **симетричну систему напруг**:

$$\dot{U}'_A = \dot{U}'_B = \dot{U}'_C,$$

які, як і у випадку симетричного навантаження, зв'язані з лінійною напругою за формулою: $U_\lambda = \sqrt{3}U_\phi$.

Лінійні струми дорівнюють фазним ($I_\lambda = I_\phi$).

Струми фаз будуть несиметричними й незалежними, тобто при зміні опору фази "А" буде змінюватися струм тільки у фазі А, а у фазах В і С - струми змінюватися не будуть.

Струм нейтрального провідника дорівнює:

$$I_{nN} = I_a + I_b + I_c,$$

або їх геометричній сумі $\vec{I}_{nN} = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c$.

Таким чином, **введення нейтрального проводу дозволяє зрівноважити фазну напругу на несиметричному навантаженні**.

Для підвищення надійності нормальної роботи несиметричного споживача при сполученні його фаз зіркою в коло нейтрального провідника захисних пристроїв, наприклад, запобіжників не ставлять. В протилежному випадку перегорання запобіжника викличе відсутність нульового

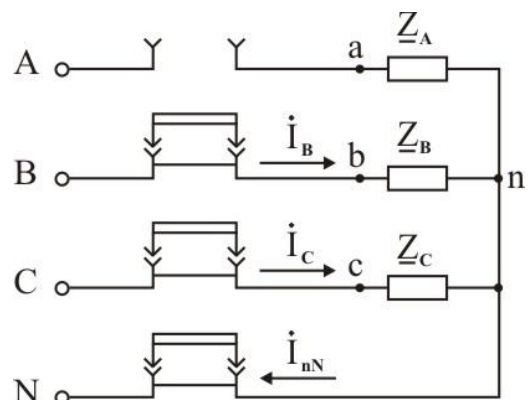


Рис. 43

провідника в трифазному несиметричному колі, а звідси й всі негативні наслідки. Запобіжники зазвичай ставлять на фазах споживачів.

Обрив лінійного проводу

У випадку обриву лінійного проводу, наприклад, фази *A* (рис.43), приймачі даної фази залишаються без електричної енергії, а приймачі інших фаз (*B*, *C*) будуть продовжувати одержувати живлення. Але при відсутності нейтрального проводу фазні напруги на затискачах обох вже *послідовно з'єднаних приймачів* фаз *B* і *C* пропорційні величинам їх повних опорів. Якщо в одній із фаз (наприклад, в фазі *B*) навантаження буде мати індуктивний характер, а в іншій (фазі *C*) – ємнісний, то при рівності реактивних опорів цих фаз може виникнути резонанс напруг, що спричинить різке зростання споживаного струму і встановлення значних напруг на затискачах приймачів.

При наявності нейтрального проводу приймачі, які підключені до непошкоджених проводів, обрив лінійного проводу не відчувають.

З'єднання споживачів трикутником, симетричне та несиметричне навантаження

1. При з'єднанні споживачів трикутником (рис.44, а) лінійна напруга дорівнює фазній на навантаженні споживачів $U_l = U_\phi$ (тобто, $U_{AB} = U_{ac}$, $U_{BC} = U_{bc}$, $U_{CA} = U_{ca}$).

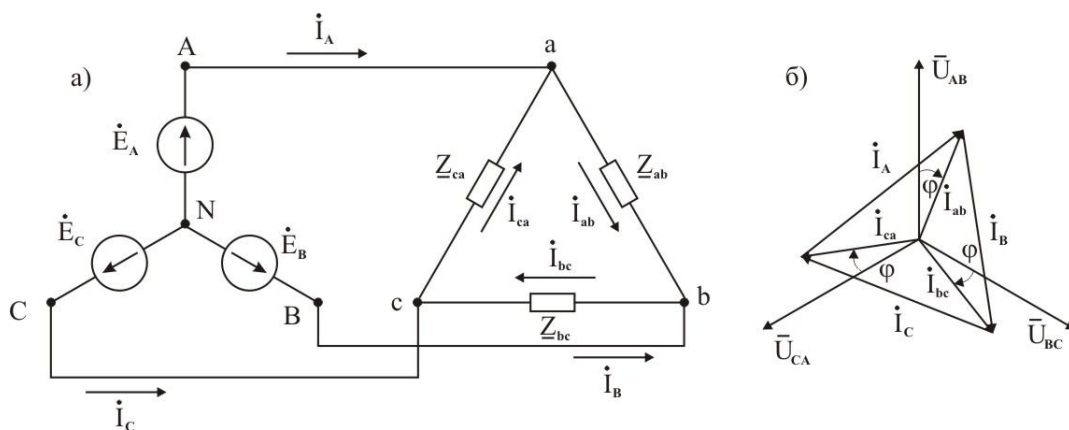


Рис.44

2. Фазні струми визначаються за допомогою фазних напруг:

$$I_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}, \quad I_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}, \quad I_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}.$$

3. Лінійні струми обчислюються за допомогою основних співвідношень струмів щодо з'єднання трикутником:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \end{aligned}$$

4. Незалежно від характеру навантаження завжди

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

5. При симетричному навантаженні ($Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$) фазні струми рівні за величиною і кути зсуву фаз струмів по відношенню до відповідних фазних напруг однакові. Векторна діаграма напруг і струмів при симетричному навантаженні, з'єднаному трикутником, зображена на рис. 44,б.

6. Співвідношення між лінійними і фазними струмами для випадку симетричного навантаження одержуємо з рис.45.

З прямокутного трикутника "Отп":

$$I_l / 2 = I_\phi \cdot \cos 30^\circ;$$

$$I_l / 2 = I_\phi \sqrt{3} / 2, \text{ тобто } I_l = I_\phi \sqrt{3}.$$

При з'єднанні трикутником у випадку симетричного навантаження лінійний струм кола в $\sqrt{3}$ разів більше фазного струму приймача.

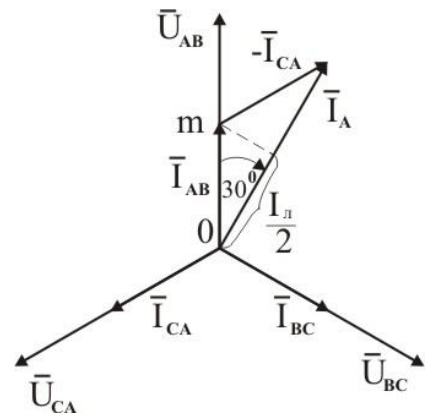


Рис.45

7. При несиметричному режимі роботи, наприклад при зміні опору однієї з фаз, режим роботи інших двох фаз не змінюється, так як лінійні напруги генератора залишаються незмінними. Змінюється лише струм цієї фази та лінійні струми у проводах, що з'єднані з цією фазою. Тому схему з'єднання трикутником дуже зручно використовувати при несиметричному навантаженні. Явище "перекосу фаз" принципово не може виникати.

Що стосується симетричних трифазних приймачів, то їх можна вмикати в трьохпровідне коло або зіркою, або трикутником.

Обрив лінійного проводу

Розглянемо обрив лінійного проводу A ($I_A = 0$, рис.46,а). У випадку обриву фази A опори навантажень Z_{ab} і Z_{ca} виявляються з'єднаними послідовно, тому

$$I_{ab} = I_{ca} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{ab} + Z_{ca}}, \quad I_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{bc}}.$$

Згідно з першим законом Кірхгофа: $I_C = I_{bc} + I_{ca}$, $I_C = -I_B$ (рис.46,б).

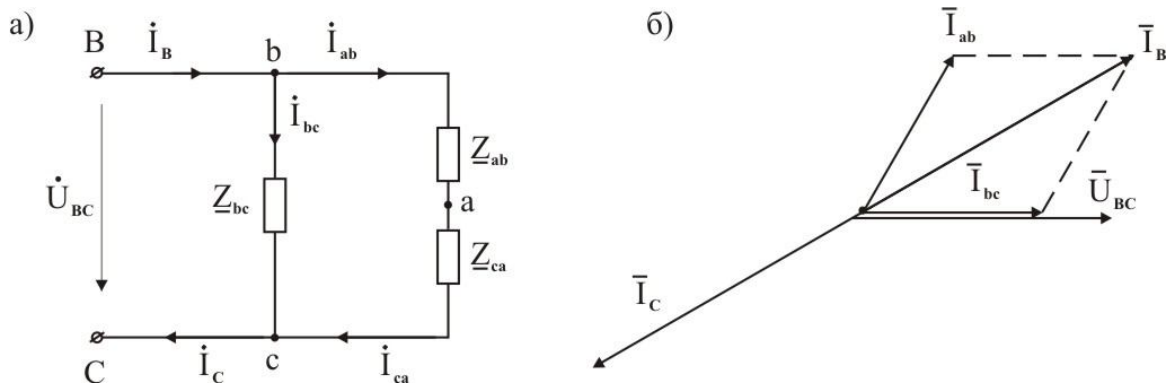


Рис.46

Активна , реактивна та повна потужності трифазного кола

1) **Комплексною потужністю** трифазної системи називається сума комплексних потужностей всіх фаз джерела енергії, яка, згідно з балансом потужності, дорівнює сумі комплексних потужностей всіх фаз приймача:

для зірки

$$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C ;$$

для трикутника

$$\underline{S} = \underline{S}_{ab} + \underline{S}_{bc} + \underline{S}_{ca} .$$

Так як комплексна потужність кожної фази споживача при з'єднанні зірка дорівнює

$$\underline{S}_A = P_A + jQ_A ,$$

$$\underline{S}_B = P_B + jQ_B ,$$

$$\underline{S}_C = P_C + jQ_C ,$$

то комплексна повна потужність трифазної системи для з'єднання зірка

$$\underline{S} = (P_A + P_B + P_C) + j(Q_A + Q_B + Q_C) ,$$

аналогічно одержуємо вираз для трикутника

$$\underline{S} = (P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}) + j(Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}) .$$

Дійсна частина комплексної потужності називається **активною потужністю трифазної системи**, уявна частина - **реактивною потужністю трифазної системи**.

2) **Активна потужність** трифазної системи є сумою активних потужностей всіх фаз джерела енергії, яка, згідно з балансом потужності, дорівнює сумі активних потужностей окремих фаз приймача:

для зірки

$$P = P_A + P_B + P_C ,$$

для трикутника

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} .$$

При **симетричному навантаженні**, як для зірки, так і для трикутника, потужності трьох фаз P_ϕ рівні. Отже, сумарна потужність трифазного приймача, з'єданого зіркою, або трикутником:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos\phi , \tag{33}$$

де $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos\phi$ - активна потужність однієї фази споживача.

3) **Реактивна потужність** трифазної системи є сумою реактивних потужностей всіх фаз джерела енергії, яка, згідно з балансом потужності, дорівнює сумі реактивних потужностей фаз приймача:

$$\text{для зірки: } Q = Q_A + Q_B + Q_C,$$

$$\text{для трикутника: } Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}.$$

Реактивна потужність **симетричної трифазної системи, як для зірки, так і для трикутника:**

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi, \quad (34)$$

де $Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi$ - реактивна потужність однієї фази споживача.

4) Модуль повної потужності трифазної системи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (35)$$

Підставивши в формулу (35) рівняння (33) і (34), одержимо формулу для модуля **повної потужності для випадку симетричної системи** : $S = 3U_\phi I_\phi$.

5) Вирази для потужності можна записати також за допомогою лінійних величин.

$$\text{Для з'єднання зіркою: } I_l = I_\phi, \quad U_l = \sqrt{3}U_\phi,$$

а також

$$P = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi,$$

$$Q = \sqrt{3}U_l I_l \sin \varphi,$$

$$S = \sqrt{3}U_l I_l.$$

$$\text{Для з'єднання трикутником: } U_l = U_\phi, \quad I_l = \sqrt{3}I_\phi,$$

а також

$$P = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi,$$

$$Q = \sqrt{3}U_l I_l \sin \varphi,$$

$$S = \sqrt{3}U_l I_l.$$

Таким чином, співвідношення для потужності (активної, реактивної, повної) не залежить від виду з'єднань.

Література:

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник.-3-є вид. – К.: Каравела, 2009 – 296с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983
4. Титаренко М.В. Електротехніка: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних (неелектротехнічних) спеціальностей вузів. – К.:Кондор, 2009 – 240с.

Контрольні питання:

1. Дати визначення трифазного кола.
2. Пояснити конструкцію трифазного генератора та принцип дії.
3. Дати оцінку засобам з'єднання споживачів та джерел живлення у трифазних колах.
4. Пояснити поняття: фазний струм, фазна напруга, лінійний струм, лінійна напруга. Пояснити на схемі, де їх вимірюють.
5. Дати оцінку симетричним режимам трифазних кіл.
6. Дати оцінку несиметричним режимам трифазних кіл.
7. Навести співвідношення для напруг і струмів при з'єднанні зіркою і симетричному та несиметричному режимах роботи.
8. Навести співвідношення для напруг і струмів при з'єднанні споживачів трикутником при симетричному режимі роботи.
9. Обґрунтувати необхідність застосування нейтрального проводу при несиметричному та симетричному навантаженні.
10. Пояснити, до яких наслідків приводить обрив фази для трифазного кола з нейтральним, і без нейтрального проводу у випадку з'єднання споживачів зіркою?
11. Пояснити, до яких наслідків приводить обрив фази для трифазного кола у випадку з'єднання споживачів трикутником?
12. Пояснити основні етапи побудови векторних діаграм для трифазних ланцюгів у випадках симетричного і несиметричного навантаження..
13. Пояснити вигляд векторної діаграми при обриві фази для з'єднання навантаження зіркою у випадках наявності і відсутності нейтрального проводу?
14. Навести формули для підрахунку активної і реактивної потужності у трифазних колах у випадку симетричного навантаження.
15. Навести формули для підрахунку активної і реактивної потужності у трифазних колах у випадку несиметричного навантаження.
16. Навести формули для визначення повної потужності у трифазних колах.

Питання та завдання для самостійної роботи:

1. З'єднання споживачів трикутником в трифазному колі змінного струму, симетричне та несиметричне навантаження.
2. Співвідношення між фазними струмами та напругами. Векторні діаграми.
3. Активна, реактивна та повна потужність трифазного кола. Засоби її вимірювання.
4. Який вимірювальний прилад застосовується для вимірювання активної потужності в трифазному колі? З чого він складається і як підключається у схему?
5. Проаналізувати схеми вимірювання потужностей у трифазних колах.
6. Пояснити метод двох ватметрів.

МОДУЛЬ 2. Основи електроніки

Тема №4. Елементна база електронних пристроїв і систем

Лекція № 6.

Вступ. Елементна база електронних пристроїв і систем. Принцип дії та характеристики

План

1. Електроніка у народному господарстві.
2. Стислі відомості з історії електроніки. Електровакуумні та газонаповнені елементи.
3. Фотоелектронні елементи на зовнішньому фотоєфекті. Їх характеристики.
4. Фотоелементи на внутрішньому фотоєфекті.
5. Властивості напівпровідників в порівнянні з металами та діелектриками. Типи провідності провідників. Фізичні процеси в електронно-дірковому переході.

Зародження електроніки пов'язане з розвитком промислового виробництва наприкінці 19 на початку 20 століття. На встановлення та подальший розвиток електроніки вирішальним стало винахід радіо у 1895 році А.С.Поповим. У 1904 році англійський вчений Я.Флемінг винайшов двохелектродний електровакуумний прилад – діод. У 1907 році в США Лі де Форестом винайдена трьохелектродна електровакуумна лампа – триод, який дозволяє підсилювати та генерувати електричні коливання, що призвело до революції в радіотехніці.

Бурхливий розвиток радіотехніки в нашій країні почалося після Великої Жовтневої соціалістичної революції. І головну роль у цьому зіграла підтримка В.І. Леніна, який бачив в радіо засіб зв'язку. Спеціальним декретом від 2 грудня 1918 р., підписаний В.І. Леніним, була скликана Ніжегородська радіолабораторія. Яка під керівництвом М.А. Бонч-Бруевича була побудована сама потужна у світі (400 кВт) радіостанція ім.Комінтерна.

Побудова різних типів електровакуумних приладів призвело до розвитку у 20-30х роках радіозв'язку, радіолокації, телебачення, вимірюючої техніки і т.д.

В 30-40 роках в пристроях почали застосовувати велику кількість електронних ламп. Недоліки електронних ламп призвели до того, що спеціалісти винайшли інші електронні прибори з іншим принципом дії – напівпровідникові прилади.

В 1948 р. в США були побудовані перші напівпровідникові тріоди на базі германія – транзистори (Д. Бардин, У.Браттейн, У. Шоклі). В 1949 році транзистори були розроблені в нашій країні А.В. Красиловим та С.Г. Мадоян.

К 1968 р. в СРСР було розроблено та впроваджено біля 50 типів транзисторів, велику кількість типів діодів, тиристорів та інших напівпровідникових приладів.

Перші інтегральні схеми були винайдені у 1958 році в США, а в 1962 році розпочато їх промисловий випуск.

Визначний прогрес в електроніці помітне в побудові великих інтегральних схем (ВІС). У цих мікросхемах кількість елементів досягає кілька сотен тисяч.

80-ті році вважають часом розвитку мікропроцесорів та мікро –ЕВМ. У 2000 році розміри елементів в мікросхемах відповідають геометричним розмірам деяких бактерій або молекул.

Електровакуумні прилади

а) Електровакуумні лампи - основані на використанні явища проходження електричного струму у вакуумі. В основі роботи лежить явище термоелектронної емісії, яка полягає у виході електронів з поверхні металу за рахунок тепла (температури).

Діод (рис. 47,а) складається з вакуумного скляного балона, в який з обох боків запаяні електроди (анод, катод з підігрівом). Тиск в балоні $p = 10^{-6} - 10^{-8}$ мм. рт. ст. – високий вакуум, так як при наявності повітря в балоні розжарений катод виходить зі строю (згоряє). Крім того, молекули газів не повинні заважати вильоту електронів з катоду. Струм через діод керується зміною напруги на діоді.

Тріод (рис. 47,б) має, крім всього що а) має діод, додатковий електрод - керуючу сітку *C*, на яку подається сигнал, що керує струмом через діод.

б) Газонаповнені прилади - принцип дії побудований на явищі протікання електричного струму в газах.

Тліючий та коронний розряди в газах використовуються для стабілізації напруги. Тліючий розряд (для нього характерно світіння газу, яке нагадує світіння вугілля) відноситься до самостійного. Розряд підтримується за рахунок електронної емісії катода під ударами іонів. При виникненні тліючого розряду з'являється світіння біля катоду. Із збільшенням струму воно підсилюється і розповсюджується на всю плазму.

Газонаповнений прилад складається з балона з двома електродами (рис. 48,а). Балон заповнений інертним газом, наприклад, неоном. В умовних позначеннях газорозрядних приладів на схемах жирна точка вказує на

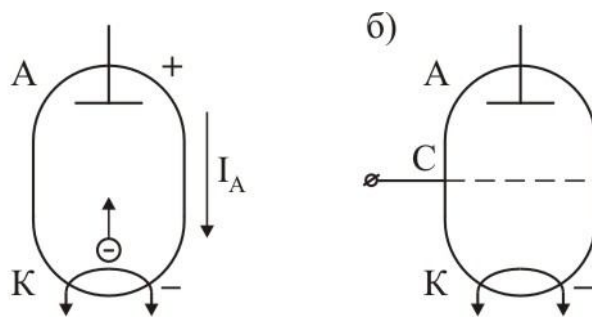


Рис. 47

наявність газу. Вольт-амперна характеристика приладу наведена на рис. 6.2,б ($U_{зан}$ – напруга запалювання, I – область темного розряду; II, III – області тліючого розряду).

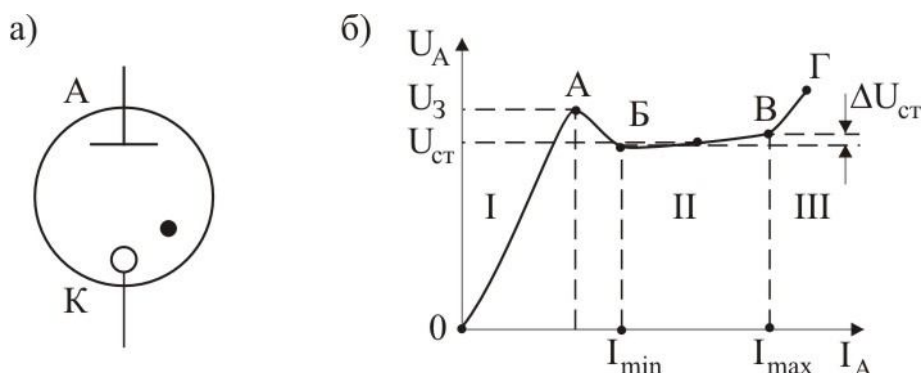


Рис. 48

При збільшенні напруги від нуля виникає дуже слабкий струм. Це область темного розряду (I). Струм темного розряду дуже малий і масштаб для нього не такий, як для іншої частини графіка (не в міліамперах, як для тліючого розряду, а в мікроамперах).

Виникнення тліючого розряду виявляється вимірюючими приладами по характерним стрибкам струму вверх і напруги вниз. Після виникнення тліючого розряду спостерігається цікаве явище: струм зростає, а напруга на приладі збільшується незначно, поки струм не стане завбільшки значення I_{max} (точка В). Цей режим зветься **режимом нормального катодного падіння** (область II). Для нього характерні проходження струму тільки через частину поверхні катода і світіння газу тільки біля цієї частини. Режим нормального катодного падіння (ділянка $I_{max} - I_{max}$) використовується в стабілітронах для стабілізації напруги.

Фотоелектронні прилади

Фотоелектронні прилади використовують зовнішній та внутрішній фотоэффект.

1) Фотоелементи, що використовують зовнішній фотоэффект

Зовнішній фотоэффект полягає у вириванні електронів з поверхні речовини під дією електромагнітного випромінювання.

Фотоелементи, що використовують зовнішній фотоэффект, бувають двох типів: **вакуумні** та **газонаповнені**.

а) **Вакуумний фотоелемент** (рис. 49,а) - використовує явище зовнішнього фотоэффекту, складається зі скляної вакуумної колби, в яку запаяні два електроди – фотокатод та анод.

Параметри:

1. Коефіцієнт динамічної чутливості визначає зміну анодного струму при зміні падаючого на фотокатод (ФК) світлового потоку на 1лм при незмінному спектрі цього випромінювання:
$$K = \frac{\Delta I}{\Delta F} = \frac{I_2 - I_1}{F_2 - F_1},$$

де I_2, I_1 – значення фотоструму фотоелемента, виміряних при однаковій напрузі і світлових потоках F_2 і F_1 .

2. Інтегральна чутливість характеризує здатність фотоелемента реагувати на весь світловий потік (або на весь спектр падаючого випромінювання).

3. Спектральна чутливість характеризує здатність фотоелемента реагувати на світлові коливання певної частоти.

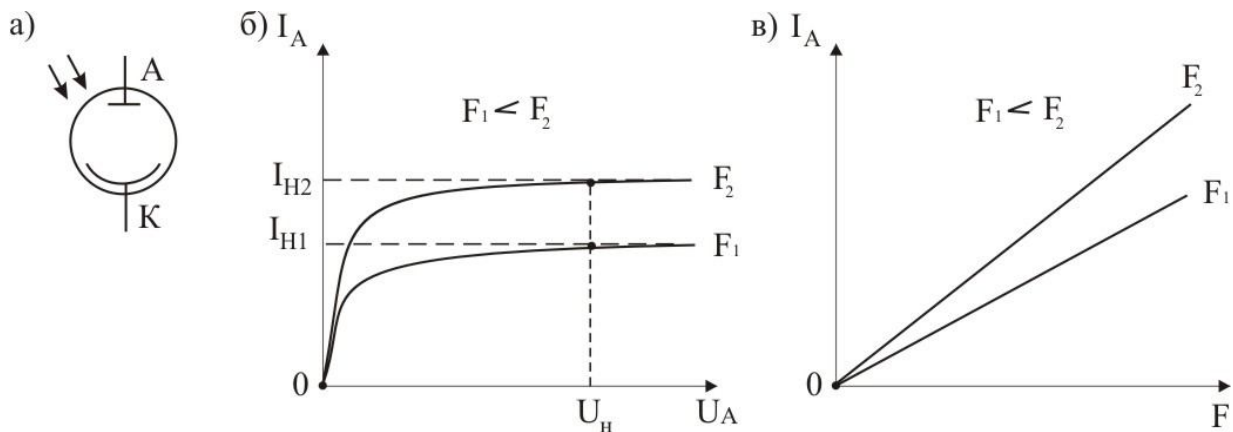


Рис. 49

Характеристики:

1. Вольт-амперна характеристика $I_a = f(U_a) \Big|_{F = const}$ (рис. 49,б) – залежність струму фотоелемента від значення анодної напруги, прикладеної до фотоелемента, при сталому світловому потоці.
2. Світлова характеристика $I_a = f(F) \Big|_{U_a = const}$ (рис.49,в) – показує залежність струму фотоелемента від величини світлового потоку при сталій анодній напрузі.

б) Газонаповнений фотоелемент (рис.50,а) – будова така ж сама, як і у газонаповненого, але балон заповнений інертним газом. Внаслідок цього його вольт-амперна характеристика (рис. 50,б) відрізняється від вольт-амперної характеристики вакуумного фотоелемента - на ній явно відсутня область насичення, і світлова характеристика є нелінійною (рис. 50,в). Відсутність ділянки насичення на вольт-амперній характеристиці пояснюється процесом іонізації газу.

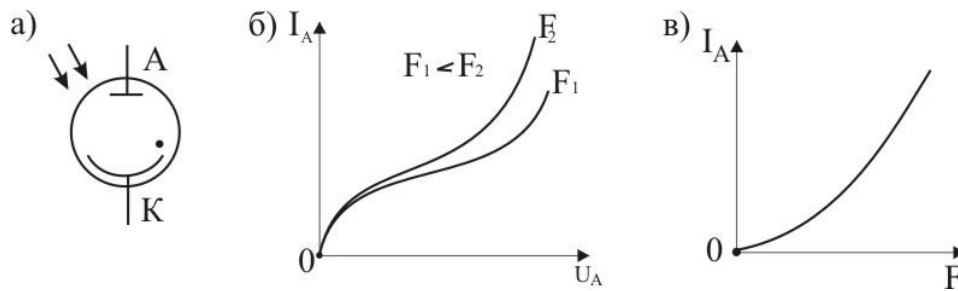


Рис. 50

2) Фотоеlementи, що використовують внутрішній фотоефект

Внутрішній фотоефект – явище збільшення електропровідності напівпровідника під дією електромагнітного випромінювання.

Фоторезистори

Фоторезистори (рис.51,а) виготовляються з напівпровідникового матеріалу. Фоторезистор вмикається в коло послідовно з джерелом напруги і опором навантаження. Якщо резистор знаходиться у темноті, то через нього тече темновий струм: $I_T = \frac{E}{R_T + R_H}$, де E – ЕРС джерела живлення, R_T – величина електричного опору фоторезистора в темноті, яка називається темновим опором, R_H – опір навантаження.

При опромінюванні фоторезистора енергія фотона витрачається на переведення електронів в зону провідності. Кількість вільних електронно-діркових пар зростає, опір фоторезистора падає і через нього тече світловий струм:

$$I_C = \frac{E}{R_C + R_H} .$$

Різниця між світловим та темновим струмом дає значення струму I_ϕ , який одержав назву первинного фотоструму провідності:

$$I_\phi = I_C - I_T.$$

Основні характеристики фоторезистора:

а) **Вольт-амперна** $I_a = f(U_a) \Big|_{F = const}$ (рис.51,б) – залежність фотоструму

(при сталому світловому потоці) від прикладеної напруги. Для фоторезисторів ця залежність практично лінійна.

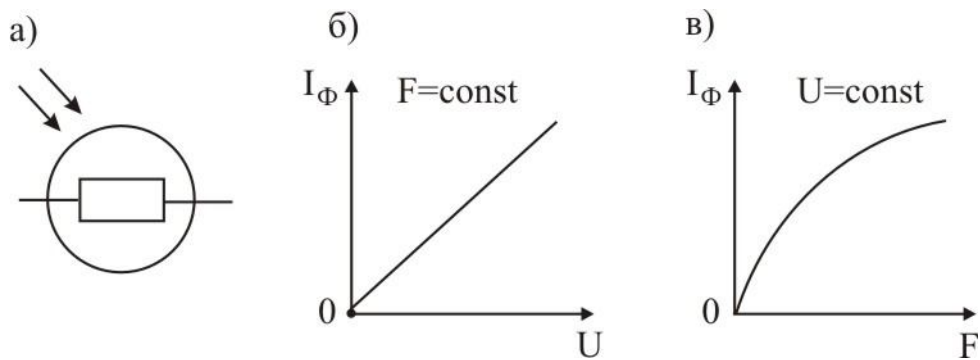


Рис. 51

б) Світлова (люкс- амперна) – залежність фотоструму від світлового потоку сталого спектрального складу, який падає на фоторезистор (рис.51,в).

В порівнянні з електровакуумними фотоелементами фоторезистори мають більшу чутливість, малі габаритні розміри, характеризуються відносно невеликою зміною параметрів з часом. Властивість фоторезистора – різка зміна опору при переході від стану затемнення до освітлення, при відносно малих змінах світлового потоку, використовується для управління електромагнітним реле.

Фотодіоди

Фотодіодом називають напівпровідниковий фотоелектричний прилад з внутрішнім фотоелементом, який має один електронно-дірковий перехід і два виводи (рис.52,а). Робота фотодіода базується на виникненні ЕРС при його освітленні (рис.52,б). При відсутності освітлення основні носії зарядів не проходять через діод завдяки потенціальному бар'єру, який існує на контакті двох напівпровідників .

Під дією освітлення зв'язки електронів з атомами розриваються, утворюються пари електрон-дірка. Електрони накопичуються в n -області, а дірки – в p -області. Це явище й являє собою утворення фотоелектрорушійної сили на затискачах фотодіода.

Фотодіоди можуть працювати в одному з двох режимів: 1) без зовнішнього джерела електричної енергії (*генераторний режим*, рис.52,в); 2) з зовнішнім джерелом живлення (*фотоперетворювальний режим*, рис.52,г).

Фотодіоди в *генераторному режимі* використовуються як джерела живлення, перетворюючи світлове випромінювання в електричну енергію. Величина фотоелектрорушійної сили залежить від типу напівпровідника і світлового потоку.

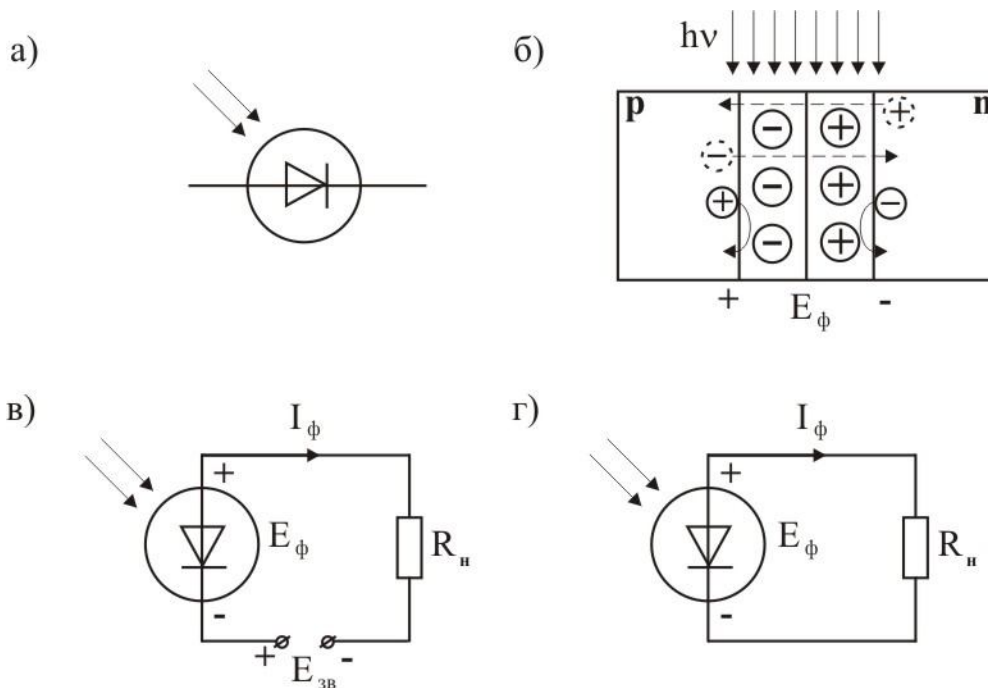


Рис. 52

У фотоперетворюючому режимі до фотодіода підключається зовнішнє джерело живлення у зворотному напрямі (мінус подається на p-область). Тому при відсутності освітлення в колі діода немає струму.

Основними характеристиками фотодіода є:

- 1) вольт-амперна характеристика (залежність струму фотодіода від напруги на ньому при сталому значенні світлового потоку: $I_{\phi} = f(U)$ при $F = \text{const}$);
- 2) світлова характеристика (залежність струму фотодіода від величини світлового потоку при сталій напрузі на фотодіоді: $I_{\phi} = f(F)$ при $U_{\text{д}} = \text{const}$).

Література:

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник.-3-є вид. – К.: Каравела, 2009 – 296с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983
4. Под ред. Герасимова В.Г. Основы промышленной электроники.- М.:Высш. шк., 1986.
5. Жеребцов Н.П. Основы электроники. . М.: 1990.
6. Гусев В.Г. Электроника. Учеб. пособ. - М.: Высш. шк. 1991. - 622с.

Контрольні питання

1. Пояснити конструкцію електровакуумного діода, тріода. Пояснити принцип їх дії. Яку роль грає сітка в тріоді?
2. Для чого використовується газонаповнені елементи? Який вид розряду існує в газонаповненому елементі? Які причини виникнення темного струму?
3. Назвати області використання фотоелементів.
4. Пояснити будову вакуумного та газонаповненого фотоелементів. Яке явище лежить в основі їх роботи?
5. Накреслити вольт-амперні характеристики для вакуумного і газонаповненого фотоелементів і пояснити їх.
6. Що таке спектральна та інтегральна чутливості фотоелементу?
7. Записати формулу, за якою визначається інтегральна чутливість фотоелементів.
8. Пояснити світлові характеристики вакуумного і газонаповненого фотоелементів.
9. На якому явищі основана дія фоторезистора? Накреслити його вольт-амперну та світлову характеристики, пояснити їх.
10. Фотодіод, його будова. Пояснити процес виникнення фото-ЕРС у фотодіоді.
11. Накреслити дві схеми застосування фотодіоду у генераторному та фотоперетворювальному режимах. Пояснити їх роботу.

Питання та завдання для самостійної роботи:

Лекція № 7

Напівпровідникові елементи: діоди, транзистори

План

1. Діоди, їх характеристики і параметри. Стабілітрони.
2. Біполярні транзистори: їх призначення, структура, принцип роботи, схеми ввімкнення, основні параметри, статичні вольт-амперні характеристики. Режими роботи.
3. Польові транзистори, їх призначення, структура та принцип дії.

Напівпровідникові елементи

Область на границі розділу двох напівпровідників з різними типами електропровідності називається *електронно-дірковим переходом або р-п переходом*.

Основною властивістю р-п – переходу є його одностороння провідність, тобто він має нелінійний опір.

а) Електронно-дірковий перехід без напруги

Розглянемо контакт двох напівпровідників з різним типом провідності. За рахунок хаотичного теплового руху відбувається **дифузія** носіїв заряду із одного напівпровідника в інший: із напівпровідника *n*-типу в напівпровідник *p*-типу дифундують електрони, а в зворотному напрямку із напівпровідника *p*-типа в напівпровідник *n*-типу - дірки.

В результаті дифузії носіїв по обидва боки границі розділу двох напівпровідників з різним типом провідності утворюються об'ємні заряди протилежних знаків (додатні і від'ємні іони). Поміж об'ємними зарядами, що утворилися, виникає так звана контактна різниця потенціалів $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ і внутрішнє електричне поле (вектор напруженості E_k).

Таким чином, в *p-n*-переході виникає потенціальний бар'єр, який перешкоджає дифузійному переходу основних носіїв заряду.

Одночасно з дифузійним переміщенням основних носіїв через границю відбувається і зворотне переміщення неосновних носіїв під дією електричного поля контактної різниці потенціалів, тобто маємо дрейфовий струм ($I_{др}$). В усталеному режимі, тобто при динамічній рівновазі *p-n*-переходу дифузійний та дрейфовий струми рівні ($I_{др} = I_{диф}$) і протилежні за напрямом. Тому повний струм через перехід при відсутності напруги дорівнює нулю.

Таким чином в *p-n*-переході виникає шар, який називається **запірним**. **Запірний шар має набагато більший опір порівняно з опором останніх об'ємів *p*- і *n*-напівпровідників.**

Розглянемо фізичні процеси, які відбуваються в *p-n*-переході при прикладенні до нього напруги.

б) Електронно дірковий перехід при прямій напрузі (рис.53,а)

Припустимо, що джерело зовнішньої напруги підключено додатним полюсом до напівпровідника *p*-типу, а від'ємним – до напівпровідника *n*-типу. Така напруга, у якій полярність співпадає з полярністю основних носіїв, називається **прямою**.

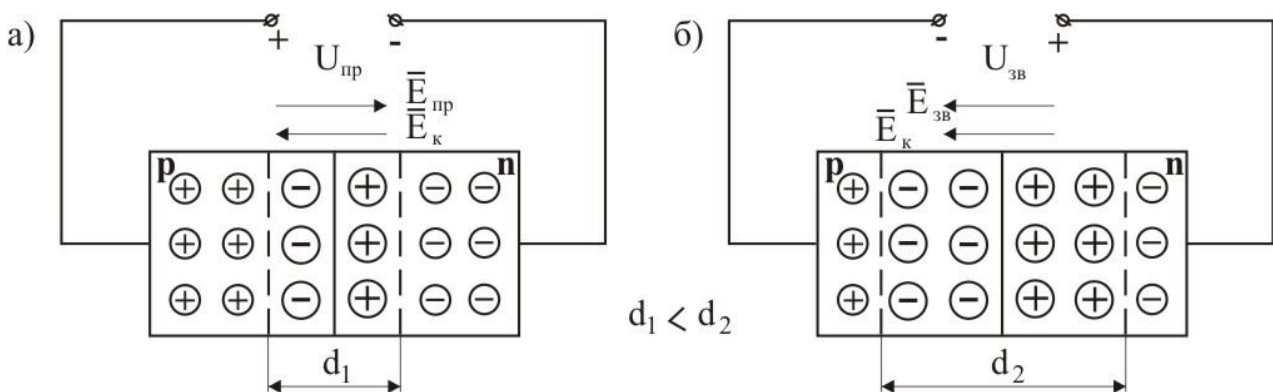


Рис. 53

Електричне поле, яке створюється зовнішньою напругою в прямому переході, діє назустріч полю контактної різниці потенціалів. Внаслідок чого результуюче поле зменшується і висота потенціального бар'єра на переході знижується, зростає дифузійний струм, так як знижений бар'єр може подолати більша кількість основних носіїв заряду. Струм дрейфу при цьому не зміниться, так як він залежить, головним чином, тільки від числа неосновних носіїв, які попадають за рахунок своїх теплових швидкостей на p - n -перехід із n - і p -областей.

При прямій зовнішній напрузі $I_{\text{диф}} > I_{\text{др}}$, тому повний струм через перехід, тобто прямий струм, вже не дорівнює нулю: $I_{\text{пр}} = I_{\text{диф}} - I_{\text{др}} > 0$.

Введення носіїв заряду через знижений під дією прямої напруги потенціальний бар'єр в область, де ці носії не є основними, називається **інжекцією носіїв заряду**. Область напівпровідникового приладу, звідки інжектують носії, називається **емітером**. А область, в яку інжектують неосновні для цієї області носії заряду, називають **базою**. Таким чином, якщо розглядати інжекцію електронів, то n -область є емітером, а p -область - базою. Для інжекції дірок, навпаки, емітер - p -область, а n -область - база.

При прямій напрузі не тільки знижується потенціальний бар'єр, але і зменшується товщина запірного шару ($d_{np} < d$, де d - товщина запірного шара при відсутності прикладеної до переходу напруги) і його опір в прямому напрямку стає малим (одиниці-десятки Ом).

в) електронно-дірковий перехід при зворотному включенні напруги (53,б)

Припустимо, що джерело зовнішньої напруги підключено від'ємним полюсом до напівпровідника p -типу, а додатним – до напівпровідника n -типу. Така напруга, у якій полярність не співпадає з полярністю основних носіїв, називається зворотною.

Маємо однакові напрямки векторів E_k і $E_{звр}$, внаслідок чого результуюче поле підсилюється ($E = E_k + E_{звр}$), висота потенціального бар'єра збільшується ($U = U_k + U_{звр}$). Вже при невеликому підвищенні бар'єра дифузне переміщення основних носіїв через перехід припиняється, тобто $i_{\text{диф}} = 0$, так як власні швидкості носіїв недостатні для подолання бар'єра. А дрейфовий струм провідності остається незмінним, оскільки він визначається основним чином числом неосновних носіїв, які попадають на p - n -перехід із n - і p -областей.

Таким чином, зворотний струм $I_{звр}$ є струмом провідності, утвореним переміщенням неосновних носіїв. Зворотний струм є дуже невеликим внаслідок малої кількості неосновних зарядів, і, крім того, опір запірного шару при зворотній напрузі дуже великий.

г) вольт-амперна характеристика

Залежність струму через p - n -перехід від прикладеної до нього напруги є вольт-амперною характеристикою p - n -переходу. Для її зняття один раз p - n -перехід включають в зворотному напрямку (рис.54, а), а потім в прямому (рис.54,б).

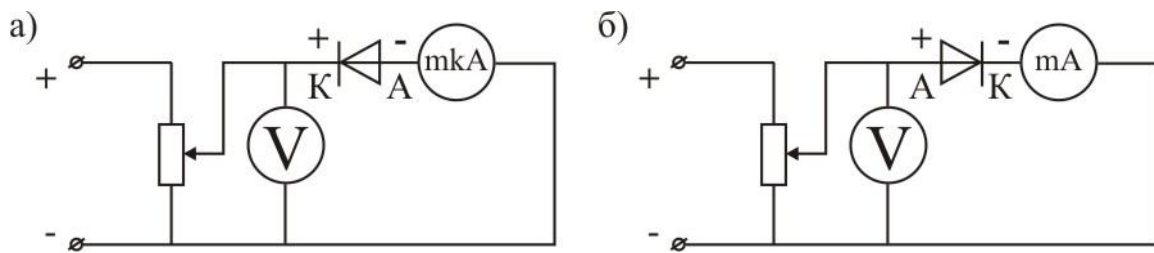


Рис.54

З наведеної вольт-амперної характеристики (рис.55) випливає, що $p-n$ -переходу притаманні нелінійні властивості. Значення і напрям струму, який протікає через $p-n$ -перехід, залежить від значення й знака прикладеної напруги. При прямій напрузі опір $p-n$ -переходу незначний, а струм великий. При зворотній напрузі опір $p-n$ -переходу набагато більший і зворотний струм дуже малий.

Отже, $p-n$ -перехід має односторонню провідність, що дає змогу використати його для випрямлення змінного струму.

Якщо зворотна напруга перевищує деяке значення $U_{прб}$, що називається **пробивною напругою**, то зворотний струм різко зростає. Якщо його не обмежити, то відбувається електричний пробій $p-n$ -переходу, що супроводжується часто тепловим пробоем. Електричний пробій пояснюється значним збільшенням напруженості електричного поля в $p-n$ -переході при $U_{зв} > U_{прб}$. Воно надає електронам і

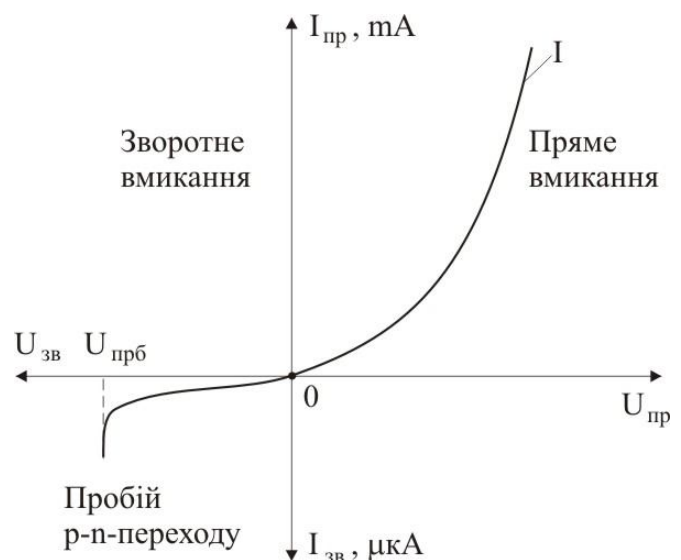


Рис. 55

діркам енергії, достатньої для ударної іонізації частинок в переході, відбувається лавиноподібне зростання додаткових пар зарядів. Внаслідок цього різко зростає зворотний струм. Короткочасний електричний пробій не руйнує $p-n$ -переходу, тобто є оборотним явищем, а тепловий пробій супроводжується перегріванням $p-n$ -переходу, що виводить його з ладу.

Напівпровідникові діоди, їх будова, характеристики

Напівпровідниковим діодом називається електроперетворювальний прилад з одним $p-n$ переходом і двома зовнішніми виводами від областей кристала з провідностями різних типів (рис.56,а, де U_3 – запірна різниця потенціалів, утворена подвійним шаром іонів на $p-n$ переході).

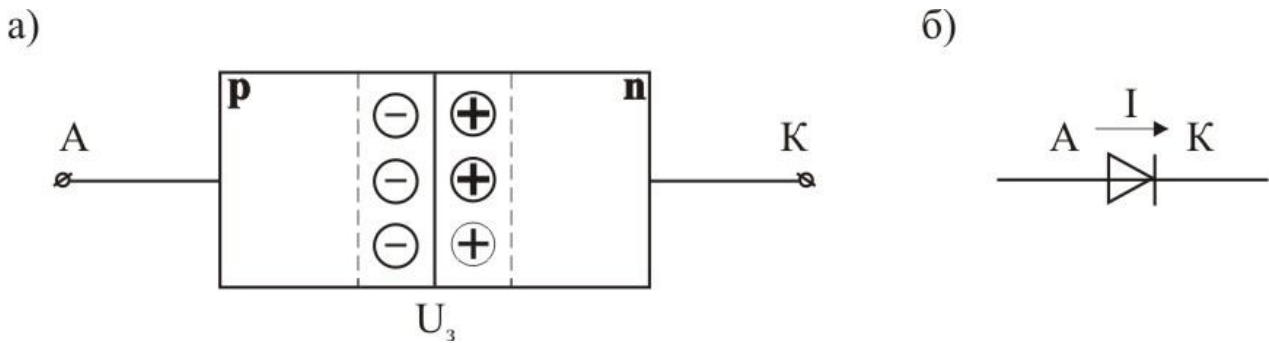


Рис.56

Схематичне позначення діода наведено на рис.56, б. Прямий струм в напівпровідниковому діоді напрямлений від одного виводу до другого, які відповідно називаються анодними і катодними виводами.

Так як властивості, електричні характеристики та параметри будь-якого напівпровідникового діода визначаються *p-n* переходом, то вольт-амперною характеристикою діода є вольт-амперна характеристика *p-n* переходу (рис.55).

Основними параметрами напівпровідникового діода є припустимий прямий струм I_{np} і відповідна йому пряма напруга U_{np} , а також припустима зворотна напруга $U_{зв}$. Пряма напруга U_{np} складає долі одиниць вольт, а величина I_{np} може досягати десятків і сотень Ампер. Припустима зворотна напруга на 2-3 порядки більше за пряму напругу. Тобто U_{np} набагато менша від $U_{зв}$. Умовою відкритого стану діода є $U_{AK} \geq U_z$. У відкритому стані (пряма гілка вольт-амперної характеристики)

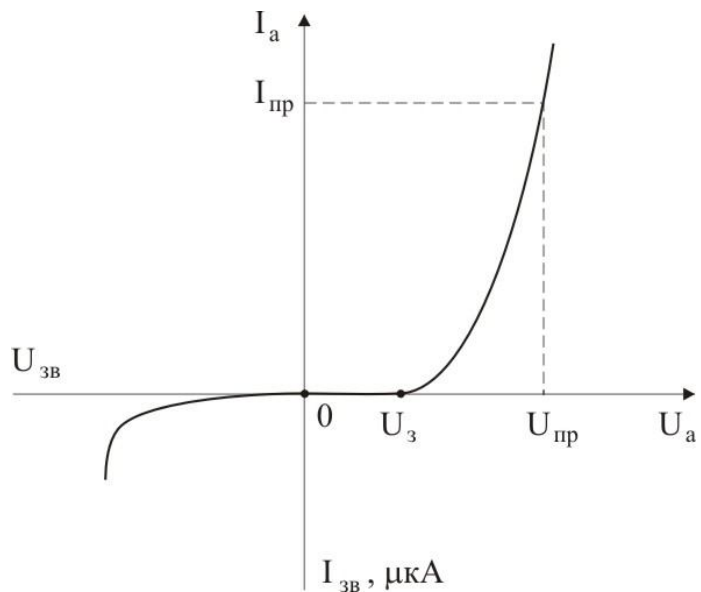


Рис.57

струм через діод утворений основними носіями заряду. В закритому стані, коли до діода прикладена зворотна напруга, по ньому однак протікає струм, який утворюється неосновними носіями зарядів, для яких не існує потенціального бар'єру (зворотна гілка вольт-амперної характеристики).

Напівпровідникові діоди широко використовуються для розв'язання широкого кола задач промислової електроніки. Малі маси та габарити, високий опір зворотному і малий опір прямому струмам, висока швидкодія дають змогу використовувати їх практично в будь-яких виробках сучасної електроніки. За призначенням напівпровідникові діоди поділяються на випрямляючі, високочастотні та надвисокочастотні, імпульсні, опорні (стабілітрони), перемикаючі, фотодіоди, світлодіоди тощо.

Стабілітрон

Стабілітрон - діод, який застосовується для стабілізації напруги в електричних колах. В стабілітронах для стабілізації напруги використовується явище неруйнівного електричного пробію $p-n$ переходу під час увімкнення діода у зворотному напрямку.

Схематичне позначення стабілітрона та його вольт-амперна характеристика наведені на рис.58 ,а,б. Якщо зворотна напруга такого діода перевищує $U_{прб}$, відбувається лавинний пробій $p-n$ - переходу. При цьому спостерігається помітне зростання зворотного струму від $I_{ст\ min}$ до $I_{ст\ max}$ при майже незмінному значенні зворотної напруги. Якщо зворотний струм через стабілітрон не перевищує припустимого значення $I_{зв\ max}$, то електричний пробій не приводить до руйнування діода протягом як завгодно тривалого часу його роботи.

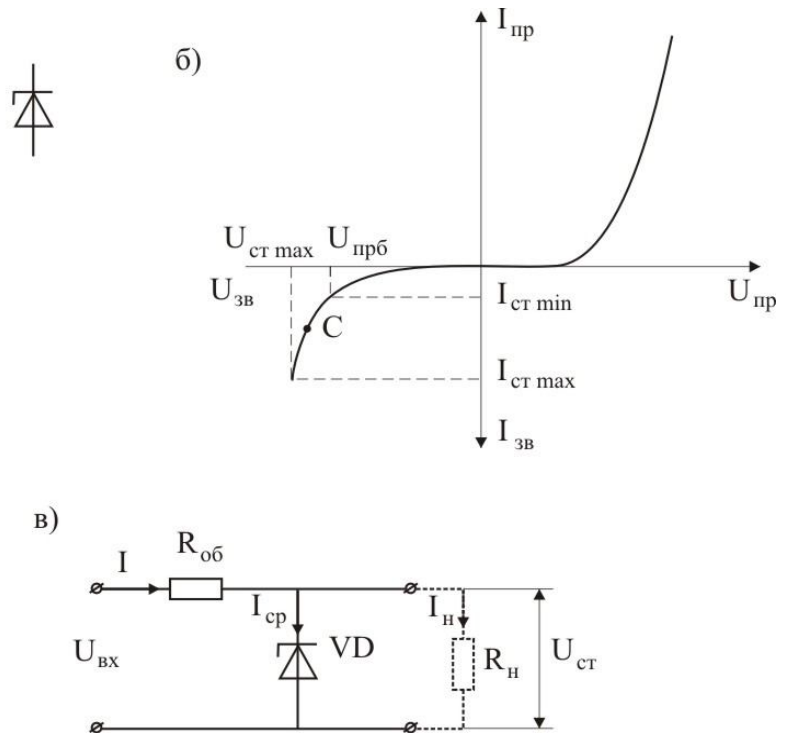


Рис.58

Це явище і використане в стабілітронах, які вмикають в схеми стабілізації джерел постійної напруги (рис.58,в), коли напруга джерела нестабільна, а опір навантаження R_n в більшості випадків постійний. На рис.58,в $R_{обм}$ – обмежувальний опір для забезпечення необхідного значення стабілізованої напруги на навантаженні R_n . Якщо напруга на затискачах джерела $U_{вх}$ коливається від U_{min} до U_{max} , то для визначення величини обмежувального опору знаходять середнє значення напруги джерела $U_{вх\ ср}$ і середнє значення струму через стабілітрон (рис.58,б):

$$U_{вх\ ср} = \frac{U_{max} + U_{min}}{2},$$

$$I_{ср} = \frac{I_{min} + I_{max}}{2}.$$

Величину обмежувального опору обирають, виходячи з законів Кірхгофа: за першим законом Кірхгофа $I = I_{ср} + I_n$, за другим законом Кірхгофа

$U_{вх.ср} = U_{обм} + U_{ст}$, де $U_{ст}$ – напруга стабілізації, що відповідає середній точці “С” на вольт-амперній характеристиці (рис.58,б). Звідси маємо:

$$R_{обм} = \frac{U_{вх.ср} - U_{ст}}{I_{ср} + I_n}$$

Транзистор

Транзистори - напівпровідникові прилади, які використовуються для підсилення електричних сигналів за потужністю. За принципом дії транзистори діляться на **біполярні** і **уніполярні** (або польові). **Біполярні транзистори** – це прилади, в яких струм зумовлений рухом носіїв зарядів двох знаків – електронів і дірок. В **уніполярних транзисторах** струм зумовлений рухом носіїв тільки одного знака(або електронами, або дірками).

Біполярний транзистор

Біполярний транзистор - це напівпровідниковий пристрій, що має два $p-n$ – переходи та три електроди. Середній електрод називається **базою** (Б), два крайні – **емітером** (Е) і **колектором** (К) (рис.59).

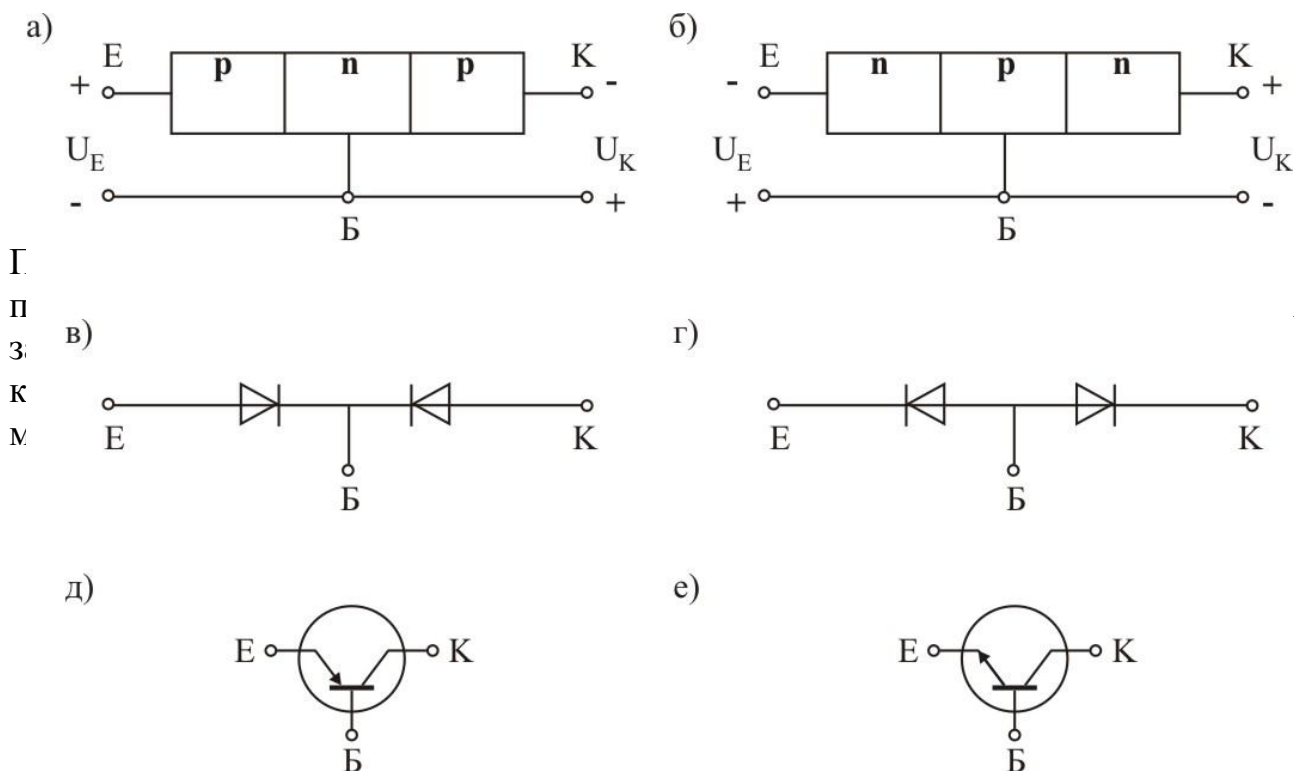


Рис.59

Розрізняють два типи транзисторів: *p-n-p* – типа (рис.59,а) та *n-p-n* – типа (рис.59,б). Їх схематичні позначення наведені на рис.59,д і 59,е відповідно.

Принцип роботи

Розглянемо процеси, що відбуваються в транзисторі, на прикладі транзистора *p-n-p* – типу за схемою під'єднання в зовнішнє коло зі спільною базою (рис.60).

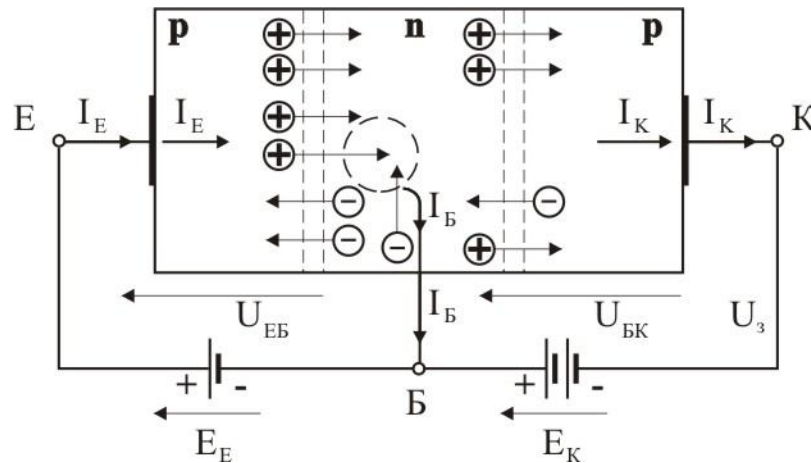


Рис. 60

До емітерного переходу (ЕП) підводиться пряма напруга U_{EB} , тому навіть при невеликих напругах через цей перехід протікає струм, який обумовлений переходом дірок з емітера в область бази (інжекцією дірок). База виконана з *n* – напівпровідника, тому дірки для неї є неосновними носіями заряду. Дірки, які потрапили в область бази, частково рекомбінують з електронами бази, створюючи базовий струм I_B .

До колекторного переходу (КП) підводиться зворотна напруга U_{BK} , яка набагато більша за U_{EB} . Решта частина дірок під дією цієї напруги долає колекторний перехід (КП), досягає колектора, створюючи колекторний струм I_K . В області контакту колектора із зовнішнім колом дірки рекомбінують з електронами, які підходять з зовнішнього кола від джерела напруги E_K . Отже, змінюючи напругу між емітером і базою, будемо змінювати концентрацію неосновних носіїв струму в базі, і тим самим регулювати струм колектор-емітер. Зміна кількості неосновних носіїв струму в базі відповідає силі струму бази I_B .

Як впливає з вищесказаного, транзистор *p-n-p* – типу підпорядковується таким правилам:

а) емітер має вищий потенціал, ніж потенціал колектора;

б) переходи емітер-база (ЕП) та база-колектор (КП) працюють як діоди (перший завжди відкритий, другий – закритий) (рис.59, в,г);

в) струм колектора пропорційний струму бази, тобто $I_K = \beta I_B$, де β – коефіцієнт передачі струму бази;

г) кожен транзистор характеризується максимальним значенням струму колектора (I_K) та бази (I_B) і напругою між колектором та емітером.

Для збільшення коефіцієнта передачі β товщину бази намагаються зробити якомога меншою.

Оскільки емітерний перехід вмикається прямо, то він має малий опір. Колекторний перехід вмикається зворотно й тому має дуже великий опір. До емітера прикладається невелика напруга (U_{EB}), а до колекторного (U_{BK}) дуже велика (десятки вольт), тобто маємо

$$U_{BK} > U_{KE} \gg U_{EB}.$$

Як видно із рис.60 зв'язок між струмами транзистора такий: $I_E = I_K + I_B$, причому $I_E > I_K \gg I_B$.

Таким чином, база грає роль регулювального опору R_p (рис. 6.15). Змінюючи опір R_p , змінюємо величину колекторного струму:

$$I_K = \frac{E_K}{R_p + R_H}.$$

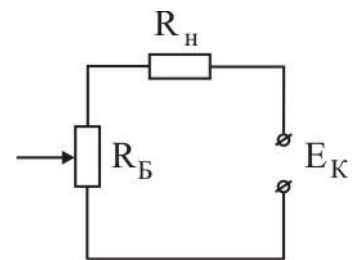


Рис. 61

Транзистор *n-p-n* – типу працює аналогічно, але до нього подаються напруги протилежної полярності (рис.59 б, г,е).

Схеми включення біполярного транзистора

В електричне коло транзистор вмикають так, що один з його електродів є вхідним, а другий – вихідним. Третій електрод є спільним відносно входу та виходу. У коло вхідного електрода вмикають джерело вхідного сигналу $U_{вх}$, який треба підсилити, в коло вихідного – опір навантаження R_H (рис.62). Залежно від того, який електрод є спільним, розрізняють три схеми вмикання транзисторів: із **спільною базою** (СБ) (рис. 63,б), **спільним емітером** (СЕ) (рис.63,а), **спільним колектором** (СК) (рис.63,в). Назва схеми показує, який електрод є спільним щодо вхідного та вихідного кола. Схеми відрізняються своїми особливостями, але принцип вмикання підпорядковується загальним правилам транзистора:

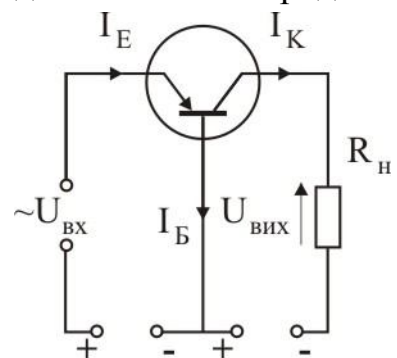


Рис. 62

емітерний перехід відкритий, а колекторний - закритий.

Вибір схеми включення залежить від вимог технічного завдання до пристрою, який проектується.

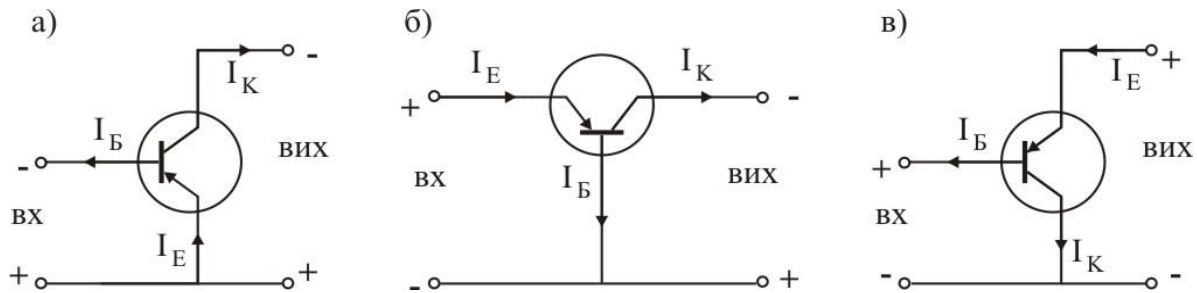


Рис. 63

Основними параметрами, що характеризують транзистор при будь-якій схемі вмикання є коефіцієнти підсилення:

за струмом $K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}}$;

за напругою $K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$;

за потужністю $K_P = K_I K_U = \frac{I_{вих} U_{вих}}{I_{вх} U_{вх}} = \frac{P_{вих}}{P_{вх}}$.

Схема із спільним емітером

Вхідним струмом в цій схемі є невеликий струм бази I_B , вихідним – струм колектора I_K (рис. 63,а). Невеликий струм бази (вхідного сигналу) керує великим струмом вихідного кола (вихідним сигналом на опорі навантаження).

Коефіцієнти підсилення такі:

коефіцієнт підсилення за струмом $K_I = \frac{I_K}{I_B} \gg 1$;

коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = \frac{U_{KE}}{U_{BE}} \gg 1$;

коефіцієнт підсилення за потужністю $K_P = K_I K_U \gg 1$.

Отже, в схемі СЕ транзистор виконує функцію підсилювального приладу, який підсилює струм, напругу і потужність. Ця схема має найбільший коефіцієнт підсилення за потужністю.

Схема із спільною базою

Вхідним струмом для цієї схеми включення є струм емітера I_E , а вихідним – струм колектора I_K (рис. 63,б) .

Схема із спільною базою має наступні коефіцієнти підсилення:

коефіцієнт підсилення за струмом $K_I = \frac{I_K}{I_E} < 1$;

коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = \frac{U_{KB}}{U_{BE}} \gg 1$;

коефіцієнт підсилення за потужністю $K_p = K_I K_U \gg 1$.

Схема із спільною базою краща за частотними характеристиками від схеми із спільним емітером. Широко використовується на телебаченні.

Схема із спільним колектором

Вхідним струмом в цій схемі є струм бази I_B , а вихідним – струм емітера I_E (рис. 63,в). Ця схема має дуже великий опір вхідного кола (зворотно увімкнений $p-n$ – перехід) і малий опір вихідного кола (прямо увімкнений емітерний перехід). Тому схема із спільним колектором використовується для узгодження опору багатоомного перетворювача з низькоомним навантаженням. Ця схема має спеціальну назву – ***емітерний повторювач***. Вхідний опір емітерного повторювача може сягати 500кОм, а вихідний – 50-100Ом.

Схема із спільним колектором має такі коефіцієнти підсилення:

коефіцієнт підсилення за струмом $K_I = \frac{I_E}{I_B} \gg 1$;

коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = \frac{U_{KE}}{U_{BK}} < 1$;

коефіцієнт підсилення за потужністю $K_p = K_I K_U \gg 1$.

Вольт-амперні характеристики біполярного транзистора

Вхідною статичною вольт-амперною характеристикою транзистора є залежність вхідного струму від вхідної напруги, прикладеної до електродів вхідного кола при відсутності джерела вхідної змінної напруги $U_{вх}$, яку треба підсилити.

Вихідною статичною вольт-амперною характеристикою транзистора є залежність вихідного струму від вихідної напруги, прикладеної до електродів вихідного кола.

а) статичні вольт - амперні характеристики транзистора р-п-р – типу, ввімкненого за схемою із спільним емітером

На рис. 64,а наведені вхідні статичні вольт-амперні характеристики

$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{KE} = const}$. Напівпровідниковий транзистор не можна механічно уявляти як два діоди, тому що процеси в одному р-п – переході впливають на процеси в іншому р-п – переході. Отже вигляд вхідної характеристики залежить також від напруги між емітером та колектором U_{KE} . В довідковій літературі реєструються дві криві цієї характеристики: для $U_{KE} = 0$ та $U_{KE} = 5В$.

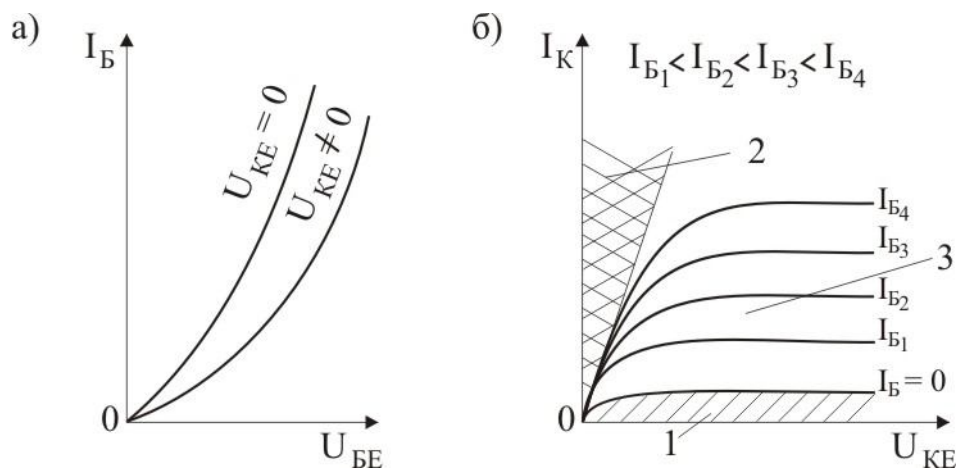


Рис. 64

Вихідні статичні характеристики наведені на рис. 64,б і відображають залежність струму колектора від напруги на колекторі при постійному струмі бази: $I_K = f(U_{KE}) \Big|_{I_B = const}$. Вихідна характеристика нагадує вольт-амперну характеристику діода, що увімкнений зворотно (особливо при $I_B=0$). На струм колектора значною мірою впливає струм бази. В робочій частині характеристик струм колектора незначно залежить від напруги між колектором та базою.

Режими роботи біполярного транзистора

В залежності від напруги між виводами транзистора від працює в наступних режимах:

а) **режим відсічки** (область (1) на рис.64,б) - обидва переходи (емітерний і колекторний) ввімкнені в зворотному напрямку, тобто транзистор закритий;

б) **режим насичення** (область (2) на рис.64,б) – обидва переходи ввімкнені в прямому напрямку, транзистор відкритий (опір транзистора $R \rightarrow 0$), через нього протікають великі струми, падіння напруги на ньому незначне;

в) **активний режим** (область (3) на рис.64,б) – емітерний перехід ввімкнений в прямому напрямку, а колекторний – у зворотному. При такому режимі струм колектора прямо пропорційний струму бази: $I_K = \beta I_B$.

Тиристор

Тиристором називають напівпровідниковий прилад з трьома або більше р-п-переходами, який може знаходитися в одному з двох стійких станів: в закритому стані з низькою провідністю, або у відкритому стані з високою провідністю.

Тиристри можна вважати аналогами електричних контактів, які можуть бути замкненими, або розімкненими. Тиристор в колі змінного струму відкривається, пропускаючи струм у навантаження лише тоді, коли миттєве значення напруги на аноді досягає певного рівня або коли подається напруга на спеціальний керуючий електрод.

За кількістю зовнішніх електродів тиристри поділяються на двоелектродні (диністри або діодні) – некеровані та триелектродні (тріодні) – керовані. Некеровані тиристри мають тільки два електроди – анод, катод; керовані тиристри мають три електроди - анод, катод, керуючий електрод.

Розглянемо їх структуру та принцип дії. Тиристри мають чотиришарову структуру напівпровідників p_1, n_1, p_2, n_2 з трьома р-п-переходами: П1, П2, П3 (рис.65,а). До крайніх шарів p_1, n_2 під'єднуються металеві виводи (анод і катод), а третій вивід з металевим контактом КЕ є керуючим електродом.

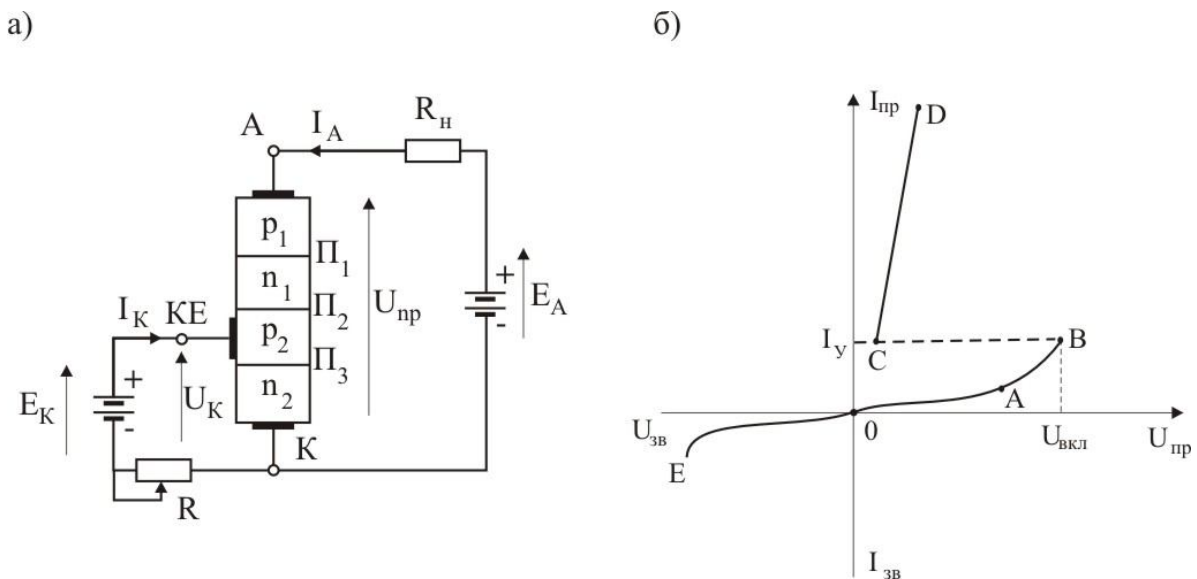


Рис. 65

Крайні області називають емітерами, середні тонкі внутрішні шари – базами. Переходи між базами і емітерами дістали назву емітерних, середній перехід називається колекторним. Катодом називають електрод, який має контакт з емітером з n-провідністю, анодом – електрод, з'єднаний з емітером з провідністю p-типу.

До анода та катода під'єднують джерело зовнішньої напруги $U_{пр}$.

При включенні тиристора в схему, так як показано на рис.65,а, прикладена зовнішня напруга вказаної полярності по відношенню до емітерних переходів (П1, П3) є прямою, а по відношенню до колекторного переходу – зворотною. Прямі напруги на емітерних переходах невеликі, і тому зовнішня напруга буде майже повністю прикладеною до зворотно ввімкненого колекторному переходу П₂.

Розглянемо випадок роботи тиристора, коли напруга керуючого електрода відсутня (струм $I_K = 0$), тобто розглянемо випадок диністора. Так як всі переходи ввімкнені послідовно, то через них повинен протікати один і той же струм. Так як П₂ закритий, то струм через диністор не проходить, якщо не враховувати малого зворотного струму через закритий перехід.

При збільшенні прикладеної напруги струм диністора деякий час буде залишатися сталим, як струм будь-якого закритого переходу. Цьому відповідає ділянка ОА вольт-амперної характеристики диністора (рис.65,б).

Подальше підвищенні напруги зовнішнього джерела збільшує зворотну напругу в переході П₂ і викликає ударну іонізацію. В цій області за рахунок сильного електричного поля виникають додаткові носії заряду – дірки і електрони. Виникає пробій переходу. Струм через П₂ збільшується, одночасно збільшується струм через П₁ і П₃. Дірки з аноду спрямовуються в базу n₁, частково рекомбінують, а частково потрапляють до бази p₂. Електрони з катодної області таким же чином опиняються в базі n₁. Вони компенсують об'ємні заряди іонів на границях переходу П₂. Перехід П₂ відкривається. Цьому відповідає точка В характеристики. Напруга, при якій відкривається перехід, називається напругою вмикання $U_{вмк}$. Після цього диністор працює на ділянці СД характеристики, яка подібна до вольт-амперної характеристики діода. Струм в колі диністора визначається в основному опором резистора R_н.

Відкритий стан переходу П₂ пов'язаний з накопиченням дірок та електронів в базах. Якщо струм через диністор стане меншим за I_y , то кількість носіїв із аноду та катода стане недостатнім для компенсації об'ємних зарядів і перехід П₂ знов закритися. Струм I_y називають струмом утримання. Диністор залишається у відкритому стані до тих пір, поки струм через нього перевищує струм утримання. Робочою ділянкою вольт-амперної характеристики є ділянка СД.

Після зміни полярності зовнішньої напруги П1 і П3 зміщуються у зворотному напрямі, а перехід П2 залишається прямим; вольт-амперна характеристика така сама, як у звичайного діода при зворотному вмиканні (ділянка ОЕ).

При виборі тиристорів використовують граничні параметри: гранично припустимий анодний струм у відкритому стані тиристора, гранично припустима зворотна напруга, гранична припустима пряма напруга в закритому стані тиристора, струм утримання.

Можна керувати напругою вмикання тиристора, не змінюючи анодної напруги. Для цього в колі однієї з баз (звичайно p_2), що прилягає до переходу П2 (рис. 65,а), вводять від зовнішнього джерела E_K додаткову кількість носіїв заряду за рахунок струму керування I_K (випадок $I_K \neq 0$). Тоді маємо тріодний тиристор. Регулюючи значення I_K , змінюють рівень напруги вмикання $U_{вмк}$, за якого виникає лавиноподібне розмноження носіїв заряду.

Отже, на відміну від транзистора, тиристор – це напівкерований ключ, який вмикається за допомогою коротких імпульсів струму, які подаються на керуючий електрод. Тиристор має принциповий недолік – неповну керованість. Для його вмикання необхідно зменшити анодний струм до нуля, що ускладнює схему.

Застосовуються також симістори – симетричні тиристори. Вольт-амперна характеристика симістора наведена на рис.66. Вони застосовуються у колах змінного струму.

На рис.67 наведені стандартні позначення тиристорів.

Малопотужні тиристори використовують в релейних схемах і малопотужних комутуючих пристроях. Потужні тиристори використовують для утворення керованих випрямлячів, інверторів і різних перетворювачів.

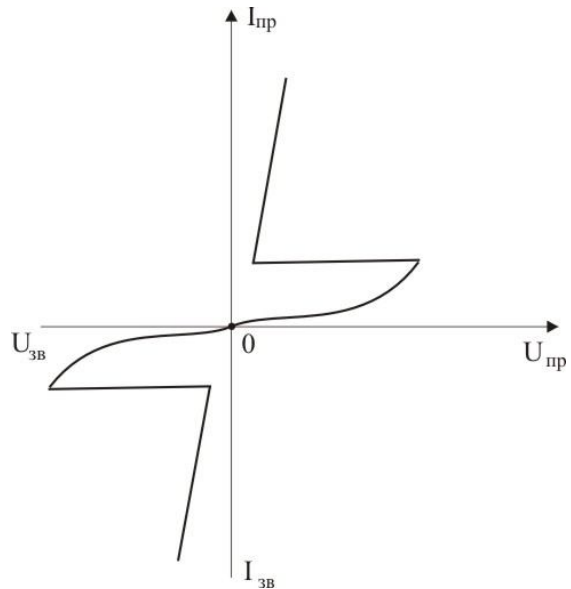


Рис.66

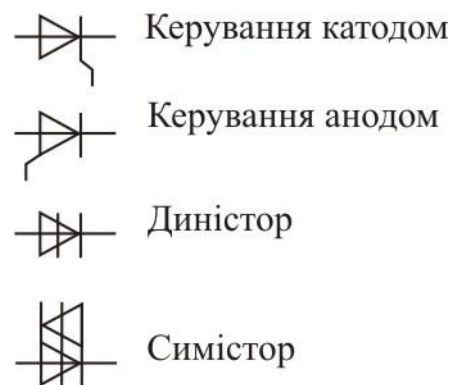


Рис. 67

Уніполярні транзистори

Будова уніполярного транзистора

Уніполярними **або** польовими транзисторами називаються напівпровідникові пристрої, в яких струм регулюється зміною провідності провідного каналу за допомогою електричного поля, перпендикулярного напрямку струму. Обидві назви цих транзисторів достатньо точно відображають їх основні особливості: проходження струму в каналі обумовлено тільки одним

типом зарядів, і керування струмом каналу здійснюється за допомогою електричного поля.

Електроди, які підключені до каналу, називаються стоком (С) та виток (В), а керуючий електрод називається затвором (З). Напруга керування, яка створює поле в каналі, прикладається між затвором та витком. В залежності від виконання затвору уніполярні транзистори поділяються на дві групи: з керуючим р-n-переходом та з ізолюваним затвором. Принцип роботи обох різновидів однакова.

Побудова польового транзистора з ізолюваним затвором (ПТІЗ) наведена на рис.68,а, а польового транзистора з керуючим переходом (ПТКП) – на рис.68,б.

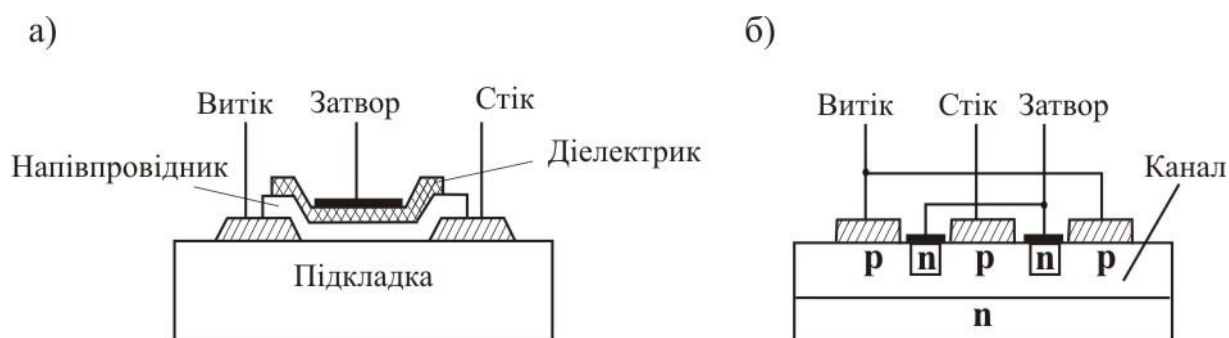


Рис.68

В польових транзисторах з ізолюваним затвором електрод затвору ізолюваний від напівпровідникового каналу за допомогою шару діелектрика з двоокису кремнію SiO_2 . Електроди стоку та виток розташовуються по обидві боки затвору і мають контакт з напівпровідниковим каналом. Струм втрати затвору нехтовно малий навіть при підвищених температурах. Напівпровідниковий канал може бути збіднений носіями зарядів або збагачений ними. При збідненому каналі електричне поле затвору підвищує його провідність, тому канал називається індукованим. Якщо канал збагачений носіями зарядів, то він називається вбудованим. Електричне поле затвору в цьому випадку призводить до збіднення каналу носіями каналу.

Провідність каналу може бути електронною або дірковою. Якщо канал має електронну провідність, то він називається n-каналом. Канали з дірковою провідністю називаються р-каналами. В результаті польові транзистори з ізолюваним затвором можуть бути 4 - х типів: з каналом n- або р-типів, кожен з яких може мати індукований або вбудований канал. Умовні схематичні зображення транзисторів з ізолюваним затвором наведені на рис.69.

Графічне позначення транзисторів несе в собі максимальну інформацію про його будову. Канал транзистора зображується вертикальною штриховою або суцільною лінією. Штрихова лінія означає індукований канал, а суцільна вбудований. Виток та стік діють як невідпрямлюючі контакти, тому зображаються під прямим кутом до каналу. Підкладка зображується як електрод зі стрілкою, напрям якої вказує тип провідності каналу. Затвор

зображується вертикальною лінією, паралельною каналу. Вивід затвору звернений до електроду витоку.

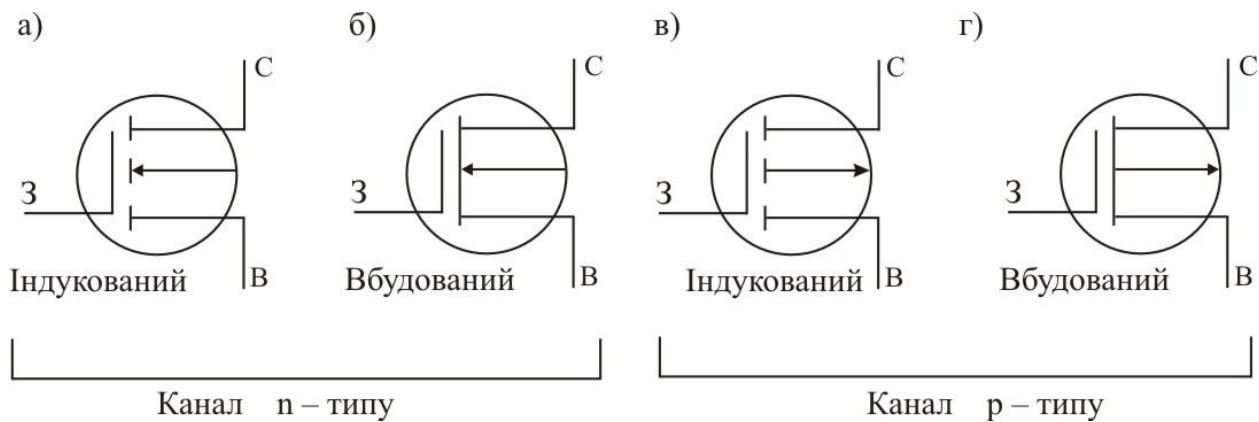


Рис.69

Будова польового транзистора з керуючим р-п- переходом наведена на рис.70. В такому транзисторі затвор виконаний у вигляді зворотно зміщеного р-п-переходу. Зміна зворотної напруги на затворі дозволяє регулювати струм в каналі. На рис.70,б наведений польовий транзистор з каналом р-типу та затвором, виконаним з областей п-типу. Збільшення зворотної напруги на затворі призводить до зниження провідності каналу, тому польові транзистори з керуючим р-п-переходом працюють тільки на збіднення каналу носіями каналу.

Умовне схематичне зображення польових транзисторів з керуючим р-п- переходом наведено на рис.70. Так як ПТКП можуть працювати тільки зі збідненням каналу, то наявність вбудованого каналу показана на цьому зображенні суцільною лінією, яка має контакти з електродами стоку та витоку. Напрямок стрілки на виході затвору вказує тип провідності каналу.

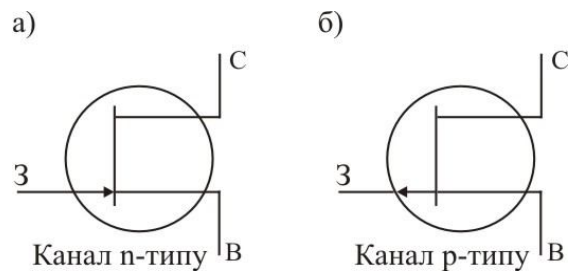


Рис.70

Принцип роботи польового транзистора з керуючим р-п- переходом

Розглянемо принцип роботи польового транзистора із керуючим р-п- переходом (рис.71,а) та його схему включення із спільним витоком (рис.71,б). Послідовно до електродів В і С вмикається напруга живлення E_{CB} і опір навантаження R_H . Напруга джерела живлення вмикається так, щоб потік основних носіїв заряду (в каналі п-типу – електронів) переміщувався від витоку до стоку. Затвор завжди вмикається зворотно витоку. Між каналом і затвором створюється р-п-перехід, що складається з двох частин.

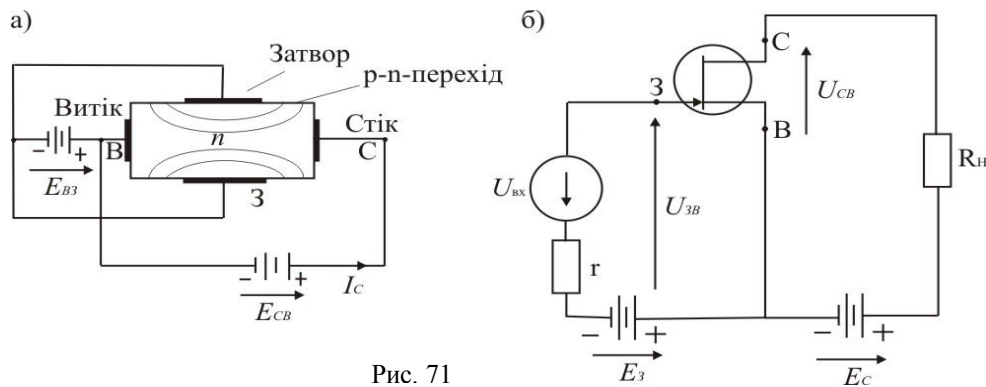


Рис. 71

Провідність каналу визначається площею її перерізу та питомою провідністю матеріалу каналу. Змінюючи напругу на затворі $U_{зв}$, можна змінювати площу перетину каналу (за рахунок розширення або звуження збіднених шарів переходів $p-n$), а отже, і опір каналу та струм I_C , що протікає через нього.

Особливістю польового транзистора є те, що на провідність каналу впливає не тільки керуюча напруга $U_{зв}$, але і напруга $U_{св}$.

Польові транзистори, як і біполярні мають три схеми вмикання: схема із спільним витоком; схема із спільним стоком; схема із спільним затвором. Основною підсилювальною схемою є схема із спільним витоком.

Література:

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник.-3-є вид. – К.: Каравела, 2009 – 296с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983
4. Под ред. Герасимова В.Г. Основы промышленной электроники.- М.:Высш. шк., 1986.
5. Жеребцов Н.П. Основы электроники. . М.: 1990.
6. Гусев В.Г. Электроника. Учеб. пособ. - М.: Высш. шк. 1991. - 622с.

Контрольні питання:

1. Пояснити виникнення електропровідності напівпровідників.
2. Чим відрізняється власна провідність напівпровідника від домішкової провідності?
3. Пояснити відмінність між n - напівпровідником і p -напівпровідником.
4. Пояснити фізичні основи роботи електронно-діркового переходу.
5. Пояснити, як підключити джерело живлення до $p-n$ - переходу, щоб через нього протікав прямий струм.
6. Пояснити, як підключити джерело живлення до $p-n$ - переходу, щоб перехід був закритим.
7. Чому прямий струм переходу на декілька порядків більше зворотного?

8. Навести вольт-амперну характеристику $p-n$ - переходу при його прямому та зворотному включеннях.
9. Дати визначення напівпровідниковому діоду. Накреслити схематичне позначення діода.
10. Пояснити призначення стабілітрону і накреслити його схематичне позначення.
11. Накреслити схему застосування стабілітрону та пояснити її роботу.
12. Дати визначення біполярному транзистору. Назвати існуючі типи біполярних транзисторів.
13. Назвати структурні елементи біполярного транзистора. Накреслити схематичне позначення транзистора та його електродів.
14. Перелічити і накреслити схеми включення біполярних транзисторів.
15. Записати формули для визначення коефіцієнту підсилення струму, напруги, потужності для схеми зі спільним емітером.
16. Записати формули для визначення коефіцієнту підсилення струму, напруги, потужності для схеми зі спільною базою.
17. Записати формули для визначення коефіцієнту підсилення струму, напруги, потужності для схеми зі спільним колектором.
18. Що називаємо вхідним опором схеми, вихідним опором? Порівняти вхідні і вихідні опори для трьох схем включення транзисторів.
19. Накреслити вхідну статичну характеристику для схеми з загальною базою. Чим визначається вхідний струм схеми у цьому випадку?
20. Накреслити вхідну статичну характеристику для схеми з загальним емітером. Від чого залежить вхідний струм для такої схеми включення?
21. Накреслити вихідну статичну характеристику для схеми з загальною базою. Чим визначається вихідний струм для такої схеми включення?
22. Накреслити вихідну статичну характеристику для схеми з загальним емітером. Чим визначається вихідний струм для такої схеми включення?
23. Перелічити структурні елементи польового транзистора.
24. Чим відрізняється біполярний транзистор від польового?

Питання та завдання для самостійної роботи:

1. Пояснити, що собою являють тиристори, для чого вони призначені.
2. Пояснити структуру диністора та його вольт-амперну характеристику. Накреслити схематичне позначення диністора.
3. Як перевести диністор в стан з низькою провідністю?

4. Перелічити основні параметри диністора.
5. Пояснити, чим триелектродні тиристори відрізняються від диністорів.
6. Пояснити ключовий режим біполярних транзисторів та його застосування.

Лекція № 8 Випрямлячі. Згладжувальні фільтри

План

1. Призначення випрямлячів.
2. Однофазний однопівперіодний випрямляч, принцип дії, основні співвідношення, зовнішня характеристика.
3. Однофазний двопівперіодний випрямляч, принцип дії, основні співвідношення.
4. Згладжувальні фільтри, їх призначення.

Випрямлячі та їх класифікація

Випрямлячі – електронні пристрої, призначені для перетворення змінного струму в постійний.

Випрямлячі бувають:

за типом випрямлення

- *однопівперіодними*;

- *двопівперіодними*;

за принципом живлення:

- *однофазними*;

- *багатофазними* (для живлення навантаження середньої та великої потужності);

за принципом регулювання напруги:

- некерованими (на діодах);

- керованими (на тиристорах).

Однофазний однопівперіодний випрямляч без фільтру, його параметри та зовнішня характеристика

Принципова схема випрямляча наведена на рис.72,а. На вхід подається змінна напруга $u_{ex} = U_m \sin \omega t$; VD – електричний вентиль - здійснює перетворення змінної напруги u_{ex} на вході схеми в пульсуючу u_n на її виході, що знімається з навантаження R_H ; u_{VD} - напруга на вентилі (u_{np} і $u_{зв}$ – пряма і зворотна напруги на вентилі); i – пульсуючий струм через навантаження; $i_{зв}$ – струм в схемі при прикладанні до вентиля зворотної напруги.

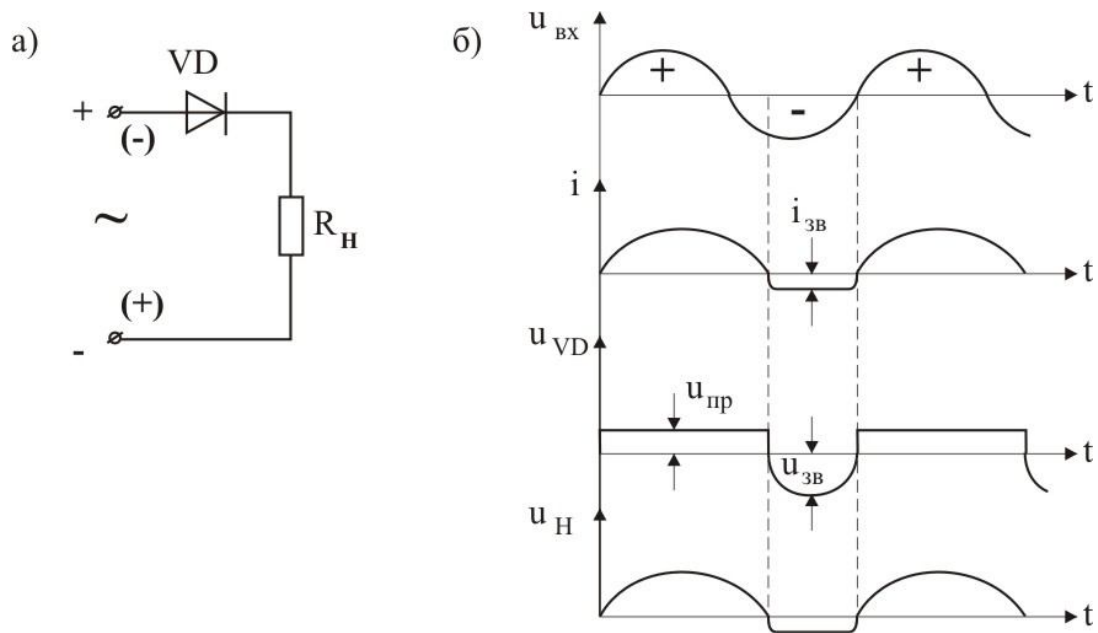


Рис.72

Часові діаграми напруг і струмів випрямляча наведені на рис.72,б. Через навантаження струм буде проходити тільки протягом однієї половини періоду, тоді, коли на аноді вентиля потенціал буде позитивним, а на катоді – негативним. При зміні знаку потенціалу на протилежний струм через вентиль не проходить, бо він має дуже великий зворотний опір. Форма випрямленої напруги u_n має пульсуючий характер.

При роботі вентилів треба враховувати максимальну зворотну напругу і максимальне та середнє значення прямого струму. А також необхідно враховувати максимальну частоту діодів: у випадку підвищення цієї частоти діоди втрачають вентиляльні властивості.

Для оцінки ефекту випрямлення пульсуючу напругу u_n розкладають на дві складові: постійну U_d і змінну $U_{m\sim}$. Постійна складова пульсуючої напруги дорівнює середньому значенню напруги, визначеному за півперіода. Для однопівперіодної схеми постійна складова напруги $U_d = 0,45U_m$. Так само розкладають на дві складові і пульсуючий струм. Постійна складова струму $I_d = 0,45I_m$ (U_m, I_m – амплітудні значення напруги і струму).

Для визначення змінної складової випрямленої напруги використовують значення коефіцієнта пульсацій: $K_{\text{п}} = (U_{m\sim}/U_d) \cdot 100\%$, який дорівнює відношенню амплітуди змінної складової випрямленої напруги до її постійної складової. Для однопівперіодної схеми $K_{\text{п}} = 157\%$, тому $U_{m\sim} = 1,57U_d$.

Зовнішня характеристика випрямляча - $U_d = f(I_d)$ наведена на рис.73.

Основною перевагою однофазного однопівперіодного випрямляча є його простота. До недоліків треба віднести: велику пульсацію напруги; невелике значення постійної складової; велику зворотну напругу – це призвело до того, що в наш час схема використовується рідко.

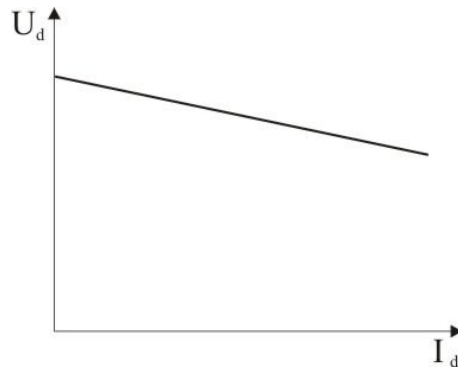


Рис.73

Мостова схема двопівперіодного однофазного випрямляча без фільтру

Схема двопівперіодного однофазного випрямляча наведена на рис.74,а.

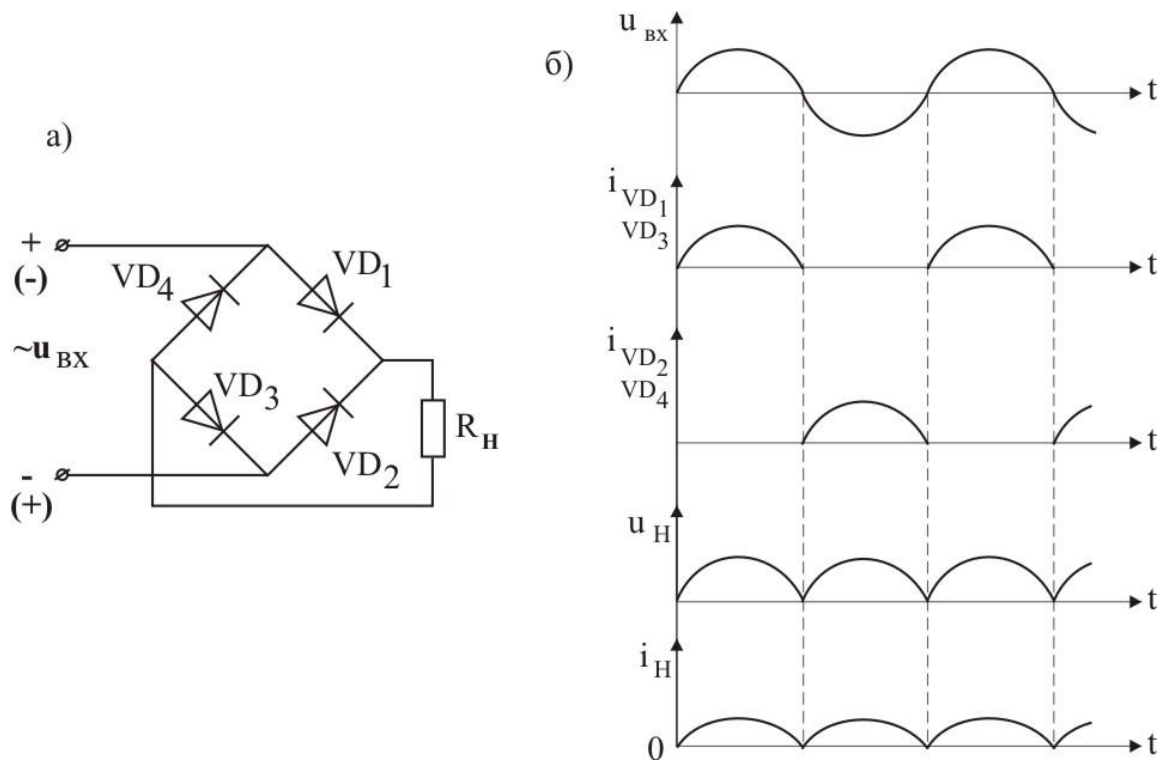


Рис.74

Чотири діоди утворюють чотири плеча випрямляючого моста. В одну діагональ ввімкнено джерело синусоїдальної напруги, в іншу - опір навантаження R_H . В першу половину періоду через два діоди (VD_1, VD_3) тече струм i_1 , два інших - зачинені. У другу половину періоду струм i_2 тече через VD_2, VD_4 , а перші - зачинені. У резисторі протікає струм тільки в одному напрямку. Постійні складові більші ніж у однопівперіодного випрямляча: $I_d = 0,9 I_m$, $U_d = 0,9 U_m$. Коефіцієнт пульсацій, навпаки,

менший: $K_n \approx 66\%$ – тобто мостова схема дає набагато кращу форму випрямленої напруги порівняно з однопівперіодною.

Часові діаграми струмів і напруг, які пояснюють роботу випрямляча, наведені на рис.74,б.

Недолік однофазного двопівперіодного випрямляча: однак велика пульсація напруги на навантаженні.

Багатофазні випрямлячі

Багатофазні випрямлячі дають можливість значно зменшити пульсації напруги на споживачах. На рис.75,а наведена схема трифазного однопотактного випрямляча (з нульовим виводом). Аноди з'єднані з виводами вторинної обмотки трансформатора, катоди об'єднані в один вузол. Навантаження R_H включено між катодом і нейтраллю трансформатора. Порядок роботи діодів залежить від потенціалів на анодах, які задаються фазними напругами трансформатора: в кожний даний момент часу струм проводить тільки діод, з'єднаний з виводом вторинної обмотки трансформатора (а,б,с), напруга на якій (u_a, u_b, u_c) додатна і найбільша.

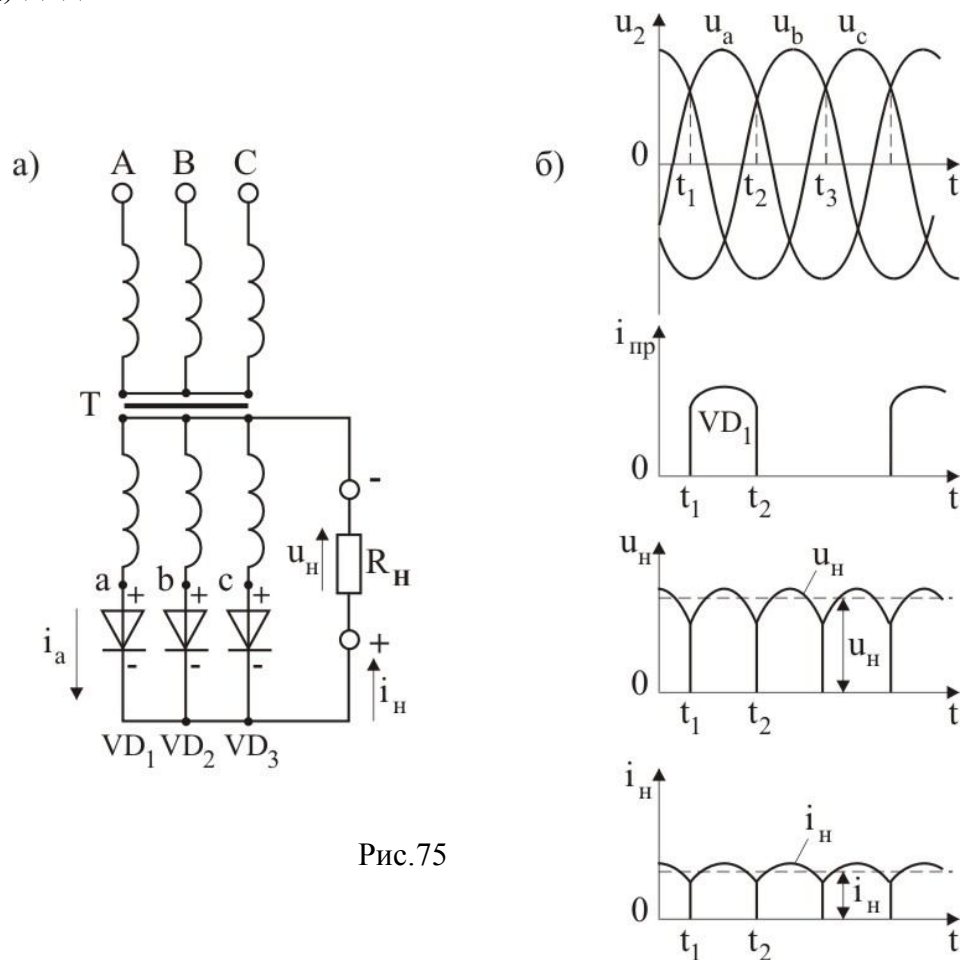


Рис.75

Графіки зміни напруг на вторинних обмотках трансформатора і криві зміни напруги і струму на навантаженні наведені на рис.75,б.

Як видно з графіку $u_n=f(t)$ криві зміни випрямленої напруги співпадають з обвідною додатних півхвиль напруг вторинних обмоток. На відміну від

попередніх випрямлячів струм навантаження ніде не спадає до нуля. Коефіцієнт пульсацій такого випрямляча дорівнює $K_n = 25\%$.

Фільтри

Для нормальної роботи більшості електронних приладів до їх джерел живлення виставляються вимоги, щоб коефіцієнт пульсацій був не більшим за $10^{-2} - 10^{-6}$. Ні одна з розглянутих схем випрямлення не забезпечує такого коефіцієнта пульсацій. Тому більшість випрямлячів працюють із згладжуючим фільтром.

Мета використання фільтра - зниження пульсацій на виході за рахунок зниження амплітуди змінної складової випрямленої напруги (або струму), без зниження сталої складової. Фільтри будуються на основі реактивних елементів кола – ємностей і індуктивностей, опір яких залежить від частоти. Фільтри бувають *активні* і *пасивні*. *Пасивні* складаються з R, L, C - елементів. Активні *ще мають і підсилювачі*.

Ємнісний фільтр

Ємнісний фільтр складається з одного конденсатора, який вмикається паралельно навантаженню.

Пояснення принципу дії фільтра. При підключенні конденсатора паралельно навантаженню (рис.76,а) струм розгалужується: частина тече через опір навантаження, частина – через конденсатор. Конденсатор є нескінченно великим опором щодо постійної складової та малим – щодо змінної.

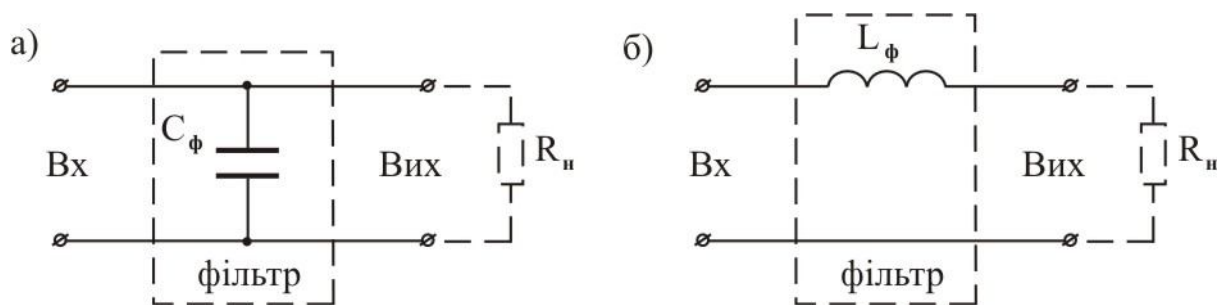


Рис.76

Протягом чверті періоду ($0 - T / 4$) конденсатор заряджається до напруги U_m , після цього вхідна $u_{вх}$ стає меншою напруги на конденсаторі u_c . Вентиль VD закривається, а конденсатор розряджається на навантаження, підтримуючи в ньому струм. По мірі розрядки конденсатора напруга на ньому зменшується, причому зменшується повільно. А так як C і R_n ввімкнені паралельно, $u_c = u_{R_n}$, то напруга і на навантаженні буде зменшуватися повільніше, ніж без конденсатора. Через інтервал часу $t = T$ потенціал анода знов починає зростати, в момент часу, що відповідає точці b, діод відкривається і конденсатор перезаряджається знов до U_m . Потім процес

повторюється. Напряга на навантаженні змінюється по кривій *abc*.

Величина $\tau = R_n C_\phi$ називається сталою часу цього процесу. Конденсатор вибирають таким чином, щоб $x_c \gg R_n$.

Ємнісний фільтр використовують в малопотужних схемах при великому R_n .

Індуктивний фільтр

Індуктивний фільтр уявляє собою індуктивність, яка вмикається послідовно з навантаженням (рис.76,б), використовується в потужних випрямлячах при малому значенні R_n .

Уявляє собою дросель (катушку на магнітопроводі). Опір дроселя $x_L = \omega_n L_\phi$, де ω_n – частота пульсацій, тому дросель не оказує опору сталій складовій струму, а тільки для змінної складової напруги на ньому.

Зростання напруги u_2 на виході випрямляча викликає зростання струму в колі дроселя L і на навантаженні R_n . Осердя дроселя намагнічується, в його обмотці з'являється ЕРС самоіндукції, що перешкоджає зростанню струму. Струм на навантаженні і напруга на ньому зростають повільніше, ніж коли індуктивності не було б. Коли напруга u_2 починає зменшуватися, зменшується струм в колі дроселя і навантаження. В обмотці дроселя виникає ЕРС самоіндукції, яка підтримує попередній струм на навантаженні. В результаті струм і напруга на навантаженні змінюються незначно.

Складні фільтри

Для одержання більших коефіцієнтів згладжування і зменшення ємності C_ϕ і L_ϕ часто використовують складні фільтри. Схеми цих фільтрів мають наступний вид (рис.77):

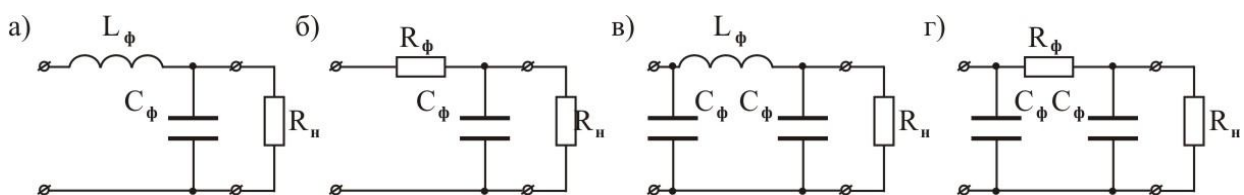


Рис.77

а), б) – Г-подібний фільтр; в), г) - П-подібний фільтр (резисторно-ємнісний).

Коефіцієнт згладжування $K_{згл} = K_{п\ вх} / K_{п\ вих}$ дорівнює відношенню пульсацій на вході до пульсацій на виході.

Інші електронні перетворювальні пристрої

Інвертори – пристрої, призначені для перетворення постійної напруги (або струму) в змінну напругу заданої форми і частоти.

Конвертори – перетворюють постійну напругу (або струм) одного рівня в постійну напругу (або струм) іншого рівня. В його структуру входять інвертор, випрямляч і трансформатор.

Безпосередні перетворювачі частоти – перетворюють енергію змінного струму частотою 50 гц в енергію змінного струму іншої частоти.

Стабілізатори - пристрої, призначені для підтримання заданого параметру (U чи I) на заданому рівні при наявності дестабілізуючих факторів.

Література:

1. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник.-3-є вид. – К.: Каравела, 2009 – 296с.
2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983
4. Под ред. Герасимова В.Г. Основы промышленной электроники.- М.:Высш. шк., 1986.
5. Жеребцов Н.П. Основы электроники. . М.: 1990.
6. Гусев В.Г. Электроника. Учеб. пособ. - М.: Высш. шк. 1991. - 622с.

Тема №5. Електронні підсилювачі

Лекція №9. Електронні підсилювачі

План

1. Призначення, класифікація підсилювачів та їх характеристики.
2. Однокаскадний підсилювач на біполярному транзисторі, основні характеристики.
3. Термостабілізація режимів роботи.
4. Багатокаскадні підсилювачі.
5. Зворотні зв'язки в підсилювачах.

Електронні пристрої: підсилювачі

Електронним підсилювачем називається електронний напівпровідниковий пристрій, призначений для підсилення сигналів за рахунок енергії джерела сталого струму.

Використовуються для підсилення і перетворення електричних сигналів в радіотехніці, обчислювальній і інформаційно-вимірювальній техніці, в пристроях автоматики і керування.

Класифікація підсилювачів:

за принципом дії діляться на:

- підсилювачі напруги і струму;
- підсилювачі потужності;
- електронні повторювачі;

-підсилювачі постійного струму, які, в свою чергу, діляться на диференціальні та операційні.

в залежності від пристроїв, що використовуються для підсилення, діляться на:

- транзисторні;
- електронно-лампові підсилювачі.

за структурною схемою підсилювачі діляться на:

- однокаскадні;
- багатокаскадні (де для збільшення загального коефіцієнта підсилення використовується багато каскадів).

за частотою сигналу, що підсилюється, діляться на:

- низькочастотні (від 15 Гц до 100 кГц);
- високочастотні (100 кГц – 10 МГц);
- надчастотні (сверхчастотні) (> 10 МГц);
- широкосмуговий;
- вузькосмугові (резонансні) підсилювачі.

по виду зв'язку між каскадами діляться на підсилювачі:

- з від'ємним зворотним зв'язком (Ре-зв'язком);
- з трансформаторним зв'язком;
- з безпосереднім зв'язком.

Параметри підсилювачів:

- 1) Вхідні: $u_{вх}$, $i_{вх}$, $R_{вх}$;
- 2) Вихідні: $u_{вих}$, $i_{вих}$, $R_{вих}$;
- 3) Коефіцієнти підсилення: K_u , K_i , K_p : У випадку багато каскадного підсилювача: $K = K_1 K_2 K_3 \dots K_n$
- 4) Характеристики: АХ, АЧХ, ФЧХ;
- 5) ККД;
- 6) смуга пропускання: $\Delta f = f_{max} - f_{min}$;
- 7) динамічний діапазон амплітуд D;
- 8) коефіцієнт лінійних спотворень;
- 9) коефіцієнт нелінійних спотворень.

Однокаскадний підсилювач на біполярному транзисторі з R_e – зв'язком

1) Схема підсилювача на транзисторі з загальним емітером (рис.78):

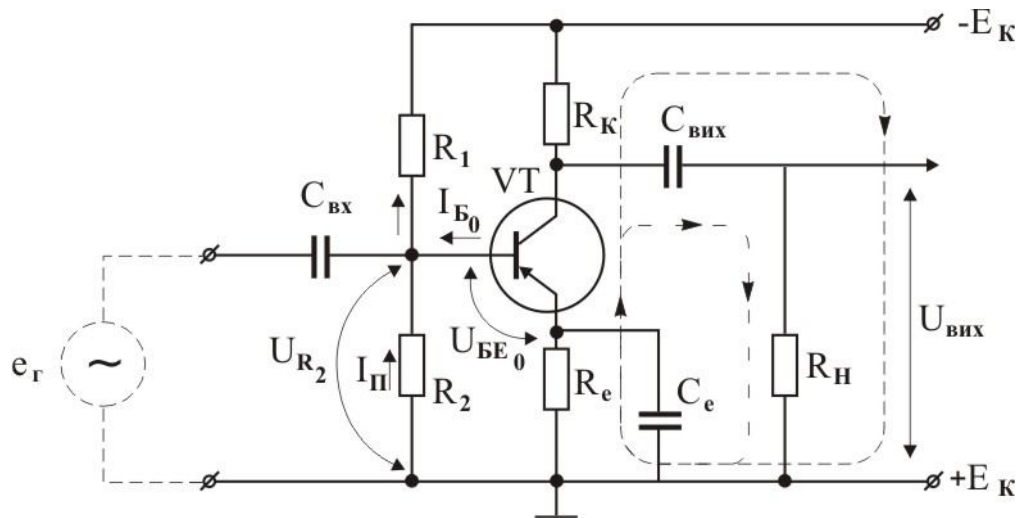


Рис.78

В схемі:

- 1) *вхід підсилювача:* затискачі емітер-база.
 - 2) *виходом* вважається вхід наступного каскаду або затискачі, до яких підключається навантаження.
 - 3) *головне коло підсилювача* - джерело живлення E_K , резистор R_K , транзистор VT;
 - 4) приймач підсиленого сигналу R_H , підключений через розподільчий конденсатор $C_{\text{вих}}$ до колектора і емітера, VT – *вихідне коло підсилювача*;
 - 5) коло e_G , $C_{\text{вх}}$, база – емітер транзистора – *вхідне коло підсилювача*.
- Генератор сигналу e_G , який треба підсилити, під'єднується до бази і емітера транзистора через розділовий конденсатор $C_{\text{вх}}$.
- б) вхідним $R_{\text{вх}}$ і вихідним $R_{\text{вих}}$ опором підсилювача називають відповідно опір з боку вхідних і вихідних затискачів підсилювача.

Особливості схеми: використовується одне джерело живлення – джерело вихідного кола E_2 , яке називають *джерелом початкового зміщення* вхідного і вихідного кола.

Струм, що тече у вхідному колі (струм бази) при відсутності вхідного змінного сигналу називається *струмом початкового зміщення* $I_{\text{б0}}$.

Струм, що тече у вихідному колі (колекторний струм) при відсутності вхідного змінного сигналу, називається *струмом початкового зміщення* $I_{\text{к0}}$ у *вихідному колі*.

Призначення елементів схеми:

- а) $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вих}}$ – розділові конденсатори – перешкоджають попаданню сталих складових напруги на вхід підсилювача і з його виходу на наступний каскад;

б) схема стабілізації з подільником напруги R_1, R_2 в колі бази забезпечує стабілізацію робочої точки транзистора шляхом утворення необхідної початкової напруги зміщення на переході база-емітер;

в) C_e – ємність, яка шунтує опір R_e в колі емітера. Її вмикають $\parallel R_e$ для того, щоб виключити падіння напруги від протікання змінної складової струму емітера, тобто для стабілізації режиму транзистора по сталому струму. Конденсатор виправдовує своє призначення, якщо виконується умова: $X_{C_e} \ll R_e$;

г) R_e забезпечує термостабілізацію схеми (тобто, струм колектора в цій схемі при зміні температури змінюється дуже мало із-за введення опору R_e .)

Чому? :

При зміні струму зміщення $I_{к с}$ (струм через колектор при подачі до переходів тільки сталої напруги, без змінного вхідного сигналу) в головному колі під дією температури змінюється падіння напруги на резисторі R_e .

Але так як для схеми напруга сталої зміщення $U_{БЕ с} = U_{R_2} - I_{к с} R_e$, де U_{R_2} – напруга на резисторі R_2 , то зміна струму $I_{к с}$ під дією температури приводить до автоматичної зміни напруги початкового зміщення $U_{БЕ с}$. Щоб R_e не впливав на значення змінного струму, він шунтується конденсатором C_e , опір якого для змінного струму малий.

Принцип дії

Напруга на переході база-емітер $U_{Б-Е} \ll E_K$, тому $I_{Кз} \gg I_{Бз}$. При цьому напруга E_2 розподіляється між лінійним елементом R_K і нелінійним елементом (транзистором) $U_{КЕ}$ прямо пропорційно їх опорам.

Якщо підключити джерело змінної ЕРС e_T , то струм у вхідному колі визначається сумарною дією E_2 і e_T і буде змінним. У вихідному колі теж з'являється змінна складова струму. Змінна напруга e_T модулює опір транзистора, а отже, і струм в головному колі підсилювача, але його значення буде значно більшим струму вхідного кола.

Наявність змінної складової струму в головному колі приведе до перерозподілу (з часом) напруги джерела E_K між лінійним елементом і нелінійним, тобто між R_K і транзистором. Інакше говорячи, у вихідному колі з'явиться змінна складова напруги.

Якщо паралельно нелінійному елементу - транзистору (затискачі 1-3) через конденсатор $C_{вих}$ підключити навантаження R_H (приймач підсиленого сигналу), то через R_H буде протікати тільки змінний струм, обумовлений змінною складовою напруги на транзисторі.

Висновки:

1. Підсилення сигналу здійснюється за рахунок енергії джерела живлення головного кола E_K .
2. Для нормального режиму роботи підсилювача у вхідному колі необхідно створити режим початкового зміщення.

3. При дії вхідного змінного сигналу на транзистор змінюється його параметр (опір), в результаті чого в головному колі підсилювача виникають змінні складові струму і напруги. Підсилювальні властивості схеми проявляються тим сильніше, чим в більших межах змінюється параметр транзистора.

Робота підсилювача в динамічному режимі (робочий режим роботи підсилювача)

На вхід поданий змінний сигнал $u_{вх} = U_m \sin \omega t \rightarrow$ Емітерний перехід транзистора зміщується в прямому напрямку по синусоїдальному закону \rightarrow Збільшується струм бази \rightarrow Збільшується падіння напруги на резисторі $R_K \rightarrow$ Зменшується напруга між колектором і емітером транзистора $U_{КЕ} \rightarrow$. Протягом від'ємного періоду вхідного сигналу зменшується струм бази і колектора. \rightarrow Зменшується падіння напруги на резисторі $R_K \rightarrow$ Збільшується напруга між колектором і емітером. З наведеного ланцюжка бачимо: при збільшенні вхідної напруги навантаженні R_H зменшується, і навпаки.

Вхідні і вихідні статичні характеристики транзистора (змінний сигнал на вході підсилювача відсутній)

При виборі значення напруги початкового зміщення в базовому колі $U_{БЕ0}$ струм бази $I_{Б0}$ однозначно вибирається за характеристикою $I_B = f(U_{БЕ})$ (точка П). На рис.79,а показаний характер зміни струму бази при наявності на вході змінного сигналу.

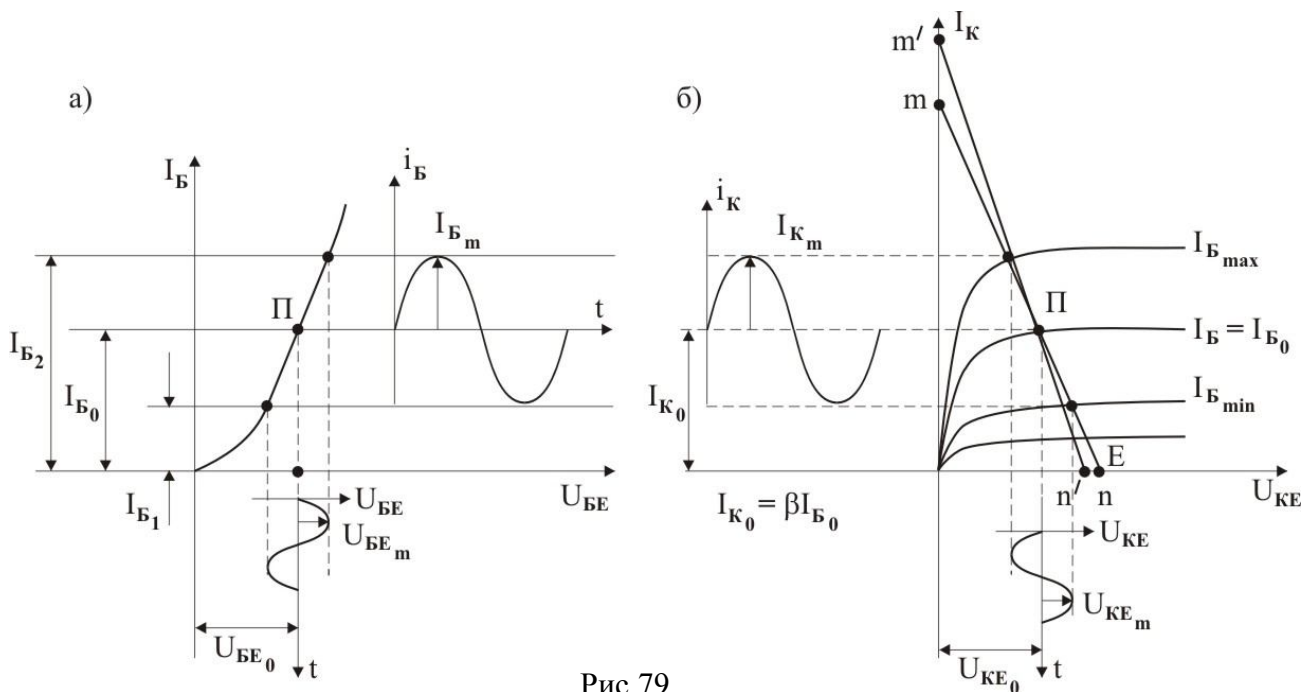


Рис.79

Для головного кола підсилювача можна записати рівняння

$$U_{КЕ} = E_K - I_K R_K \quad (36)$$

- рівняння лінії навантаження по постійному струму - характеризує розподіл напруги джерела E_K між резистором R_K і транзистором VT при

зміні струму колектора. В координатах U_{KE} I_K рівняння будується по двом точкам: при $I_K = 0$ вся напруга джерела E_K прикладена до транзистора (точка n на рис.79,б); якщо опір транзистора нехтовно малий ($U_{KE} = 0$), то в колекторному колі буде текти максимальний струм, який дорівнює $I_K = E_K / R_K$ (точка m на рис.79,б). Оскільки струм зміщення колектора I_{K0} задовольняє вираз (1), то перетинання лінії навантаження з характеристикою $I_K = f(U_{KE})$ при $I_B = I_{B0}$ визначає положення точки спокою Π в вихідному колі (рис. 79,б). Проекція цієї точки на осі I_K і U_{KE} дає чисельне значення I_{K0} і U_{KE0} в головному колі підсилювача.

Наявність змінного сигналу на вході підсилювача викликає змінну складову струму і напруги в головному колі. Для змінного струму внутрішній опір джерела E_K і опір конденсатора $C_{вих}$ нехтовно малі (на рис.78 штриховою лінією вказані контури, по яким тече змінний струм). Тому відносно змінної напруги, що виникає між колектором і емітером (U_{KE}) резистори R_K і R_H з'єднані паралельно. Результуючий опір вихідного кола для змінного струму визначається паралельним додаванням опорів R_K і R_H і дорівнює:

$$R_{KH} = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}.$$

Лінія навантаження **для змінного струму** визначається величиною R_{KH} і також проходить через точку Π , але йде крутіше, так як $R_{KH} < R_K$ (лінія $m'n'$). Миттєві значення струму і напруги в вихідному колі при наявності змінного сигналу визначаються перетином лінії $m'n'$ з вихідними характеристиками транзистора.

По результатах графічної побудови можна визначити коефіцієнти підсилення за напругою і струмом підсилювача:

$$K_U = U_{KE m} / U_{BE m} ; \quad K_I = I_{K m} / I_{B m}$$

Коефіцієнтом корисної дії підсилювача називається відношення потужності змінного струму на виході підсилювача P_{\sim} до потужності $P_{=}$, що надходить від джерела сталого струму в колекторному колі:

$$\eta = P_{\sim} / P_{=}.$$

Коефіцієнт η показує, яка частина потужності від джерела живлення перетворюється в змінний струм і суттєво залежить від вибору початкового зміщення напруги.

Класи підсилення:

а) режим класу А.

Режим, при якому положення точки початкового зміщення Π вибрано посередині лінії $m'n$, називається режимом класу А. Він характеризується умовами: $U_{KE0} > U_{KE m}$ і $I_{K0} > I_{K m}$. Перевагою режиму класу А є те, що забезпечується мінімальне спотворення форми підсилювального сигналу.

Головним недоліком є низьке значення ККД. Практичне значення ККД в цьому режимі $\eta \leq 0,35$.

б) режим класу В. Щоб перейти в цей режим, необхідно зменшити величину початкового зміщення на базі транзистора.

Характеристики підсилювачів:

1) **Амплітудна характеристика** (рис.80) - залежність амплітуди (або діючого значення) вихідної напруги підсилювача від амплітуди (або діючого значення) його вхідної напруги на деякій незмінній частоті сигналу:

$$U_{вих} = f(U_{вх}) | \omega = const$$

На рис.80:

1 – теоретична залежність;

2 - реальна (з'являється ділянка насичення).

Залежність між вхідною і вихідною напругами:

$$U_{вих} = K_U U_{вх}.$$

Амплітудна характеристика реального підсилювача не проходить через початок координат (суцільна лінія), оскільки в реальних підсилювачах напруга на виході при відсутності вхідної напруги визначається рівнем власних шумів підсилювача і завадами. При великих вхідних напругах ($U_{вх} > U_{вх\ max}$) реальна амплітудна характеристика також розходиться з ідеальною з-за перевантаження підсилювальних елементів з боку входу. Таким чином, реальний підсилювач може підсилювати без помітних спотворень напруги не нижче за $U_{вх\ min}$ і не вище за $U_{вх\ max}$ (ділянка АВ на рис.80).

Примітка: Нелінійні спотворення представляють собою зміну форми кривої підсилювальних сигналів, яка викликана нелінійними властивостями кола. Основною причиною з'явлення нелінійних спотворень в підсилювачі є не лінійність характеристик підсилювальних елементів, а також характеристик намагнічування трансформаторів або дроселів з осердям.

Наприклад, на вхід підсилювача подається синусоїдальний сигнал. Попадаючи на нелінійну ділянку вхідної характеристики транзистора, цей сигнал викликає зміну вхідного струму, форма якого відрізняється від синусоїдальної. В зв'язку з цим і вихідний струм, а значить, і вихідна напруга змінюють свою форму порівняно з вхідним сигналом.

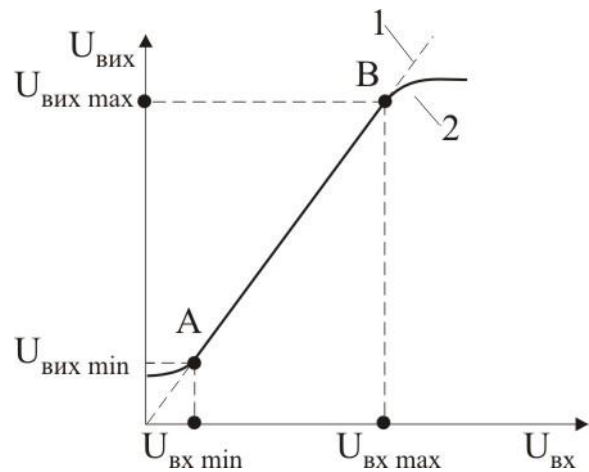


Рис.80

2) **Амплітудно-частотною характеристикою** (рис. 81) називається залежність модуля коефіцієнта підсилення напруги від частоти сигналу при сталій амплітуді сигналу на вході

$$K_U = f(\nu) \text{ | при } U_{ex} = const$$

При побудові амплітудно-частотної характеристики частіше всього використовують відносний масштаб: по осі ординат відкладають не модуль коефіцієнту підсилення, а його відношення до модуля коефіцієнта підсилення на деякій середній частоті (див. рис.81).

Смуга пропускання підсилювача:

$$\Delta\nu = \nu_B - \nu_H.$$

А – завал частотної характеристики в області низьких частот; В – завал частотної характеристики в області високих частот.

З характеристики бачимо, що найбільш сприятливі умови для передачі сигналу в області середніх частот.

Граничними частотами ν_H і ν_B вважають такі частоти, на яких коефіцієнт підсилення спадає в 1,4 разів по відношенню до його значення на середніх частотах, тобто складає приблизно $0,7 K_{cp}$.

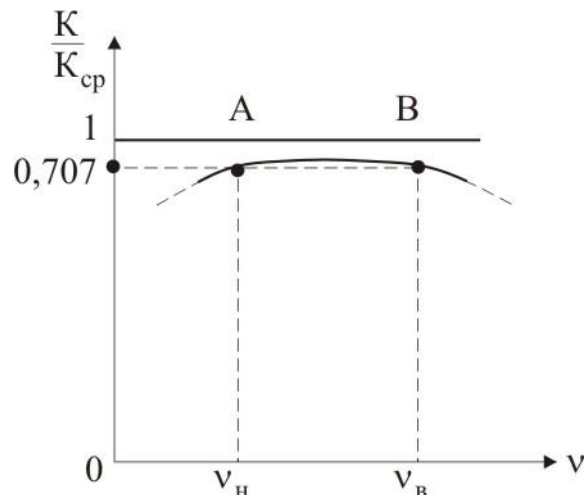


Рис.81

Пояснення амплітудно-частотної характеристики

Ряд реактивних елементів – ємностей, частина з яких ($C_{вх}, C_{вих}$) ввімкнені в схему послідовно по відношенню до входу і виходу кожного підсилювального каскаду, а частина (C_K – ємність, яку має внаслідок своїх фізичних властивостей сам транзистор, C_E) – паралельно тому чи іншому елементу.

Вплив цих ємностей на величину вихідної напруги, а отже і на величину коефіцієнта підсилення, є різним для різних частот підсилюваного сигналу.

При зниженні частоти сигналу ємнісний опір $X_{Cp} = 1 / \omega C_p$ розділових конденсаторів (тобто входних і вихідних) **зростає**. Збільшення опорів приводить до того, що падіння напруги сигналу на них зростає і вихідна напруга схеми спадає. Тому і амплітудно-частотна характеристика підсилювача падає із зниженням частоти.

При високих частотах сигналу суттєвий вплив на роботу схеми починає оказувати ємність транзистора C_K . Це приводить до завалу амплітудно-частотної характеристики підсилювача в області високих частот.

Зворотний зв'язок в підсилювачах

Зворотним зв'язком (ЗЗ) називається процес передачі енергії з вихідного кола підсилювача у вхідне коло.

ЗЗ може бути і корисним, якщо він виникає в результаті використання спеціальних схем і служить для покращання властивостей підсилювача, або паразитним, якщо він виникає за рахунок небажаного впливу різних кіл друг на друга із-за наявності ємностей і індуктивностей, або в силу фізичних властивостей підсилювальних елементів.

На практиці використовують зовнішній ЗЗ шляхом введення в схему спеціальних кіл зворотного зв'язку.

Класифікація зворотних зв'язків

В залежності від способу підключення кола зворотного зв'язку відносно вихідного і вхідного кола підсилювача розрізняють зворотний зв'язок :

- за напругою (*характеризує, як коло ЗЗ підключено відносно виходу*), послідовний (*характеризує, як коло ЗЗ підключено відносно входу*);
- за струмом (*характеризує, як коло ЗЗ підключено відносно виходу*), послідовний (*характеризує, як коло ЗЗ підключено відносно входу*);
- за напругою (аналогічно), паралельний (аналогічно);

Параметром ЗЗ є коефіцієнт передачі, який показує, яка частина вихідної напруги подається на вхід підсилювача:

$$\beta = \frac{\dot{U}_{ЗЗ}}{\dot{U}_{вих}}$$

де $U_{ЗЗ}$ – напруга ЗЗ, що надходить через коло зворотного зв'язку на вхід підсилювача.

Структурна схема підсилювача із ЗЗ за напругою, послідовна, представлена на рис.82.



Рис.82

Бачимо, що коло ЗЗ підключено до виходу підсилювача паралельно його навантаженню Z_N , напруга ЗЗ $U_{ЗЗ}$ буде прямо пропорційною напрузі на виході; і тому такий ЗЗ називають ЗЗ за напругою. А так як коло ЗЗ підключено відносно входу підсилювача послідовно, то такий ЗЗ називається ще послідовним.

Напруга \dot{U}'_{ex} , що поступає на вхід підсилювача, в загальному випадку дорівнює сумі напруг $U_{\text{вх}}$ і $U_{\text{зз}}$: $\dot{U}'_{\text{ex}} = \dot{U}_{\text{ex}} + \dot{U}_{\text{зз}}$.

ЗЗ буває :

- додатним;
- від'ємним.

Додатний ЗЗ виникає в тому випадку, коли напруга ЗЗ $U_{\text{зз}}$ співпадає за фазою з вхідною напругою $U_{\text{вх}}$. Від'ємним ЗЗ називається такий зв'язок між входом і виходом, коли напруга ЗЗ $U_{\text{зз}}$ протилежна за фазою вхідній напрузі $U_{\text{вх}}$, тобто обидві ці напруги зсунуті за фазою відносно одна одної на 180° . Загальний коефіцієнт підсилення схеми за напругою з врахування ЗЗ:

$$\dot{K}_{\text{зз}} = \frac{\dot{U}_{\text{вих}}}{\dot{U}'_{\text{ex}}}$$

Так як $\dot{U}'_{\text{ex}} = \dot{U}_{\text{ex}} + \dot{U}_{\text{зз}}$ і враховуючи, що $\frac{\dot{U}_{\text{вих}}}{\dot{U}_{\text{ex}}} = \dot{K}$ (\dot{K} – коефіцієнт підсилення підсилювача без врахування ЗЗ, \dot{U}_{ex} - напруга джерела сигналу), маємо:

$$\dot{K}_{\text{зз}} = \frac{\dot{K}}{1 \pm \beta \dot{K}}$$

де добуток βK називається фактором кола ЗЗ.

В цьому виразі для від'ємного ЗЗ в знаменнику беремо "+", а для додатного - "-".

Переваги введення від'ємного ЗЗ:

1. Збільшує стабільність коефіцієнту підсилення.
2. Зменшує нелінійні спотворення і завади, що виникають в тій частині підсилювача, яка охоплена ЗЗ.
3. Введення від'ємного ЗЗ дозволяє одержати більш рівномірну амплітудно-частотну характеристику підсилювача (тобто значно зменшує частотні спотворення) (рис. 6.38: 1) – без ЗЗ; 2) – із ЗЗ).

Для додатного ЗЗ (ДЗЗ) все навпаки.

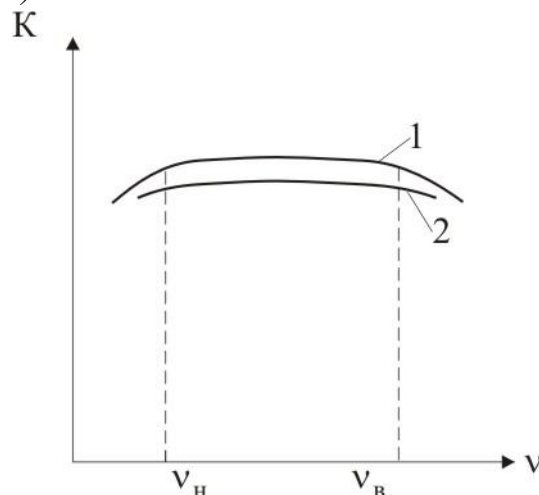


Рис.83

Підсилювачі постійного струму

Підсилювачі постійного струму призначені для підсилення сигналів, які повільно змінюються з часом, тобто сигналів, частота яких наближається до нуля. При таких частотах неможливо використовувати реактивні елементи (конденсатори, трансформатори) для міжкаскадних зв'язків, а також для зв'язку входу і виходу підсилювача відповідно з джерелом і приймачем сигналу. Тому в підсилювачах постійного струму застосовують безпосередньо омичний (гальванічний) зв'язок.

При омичних зв'язках відсутня розв'язка по постійному струму між окремими каскадами, що викликає труднощі у виборі режиму початкового зміщення. Крім того, в процесі роботи, при відсутності реактивних зв'язків, полегшується проходження сигналу завади, який виникає внаслідок зміни параметрів елементів схеми при зміні температури і напруги джерела живлення. Сигнал завади, обумовлений внутрішніми процесами, називається *дрейфом нуля підсилювача*.

Підсилювачі постійного струму поділяються на:

- диференціальні;
- операційні.

Диференціальний підсилювач

Диференціальний підсилювач (ДП) - це балансні (мостові) підсилювальні каскади паралельного типу, які характеризуються високою стабільністю параметрів при дії на них різних стабілізуючих факторів, великим коефіцієнтом підсилення диференціальних сигналів і високим ступенем заглушування синфазних завад.

Структурна схема ДП наведена на рис.84, типова – на рис.85.

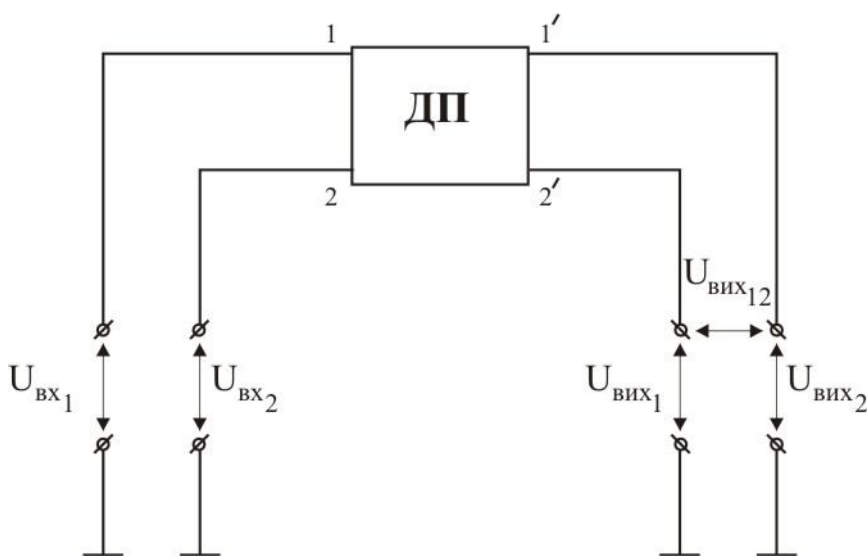


Рис.84

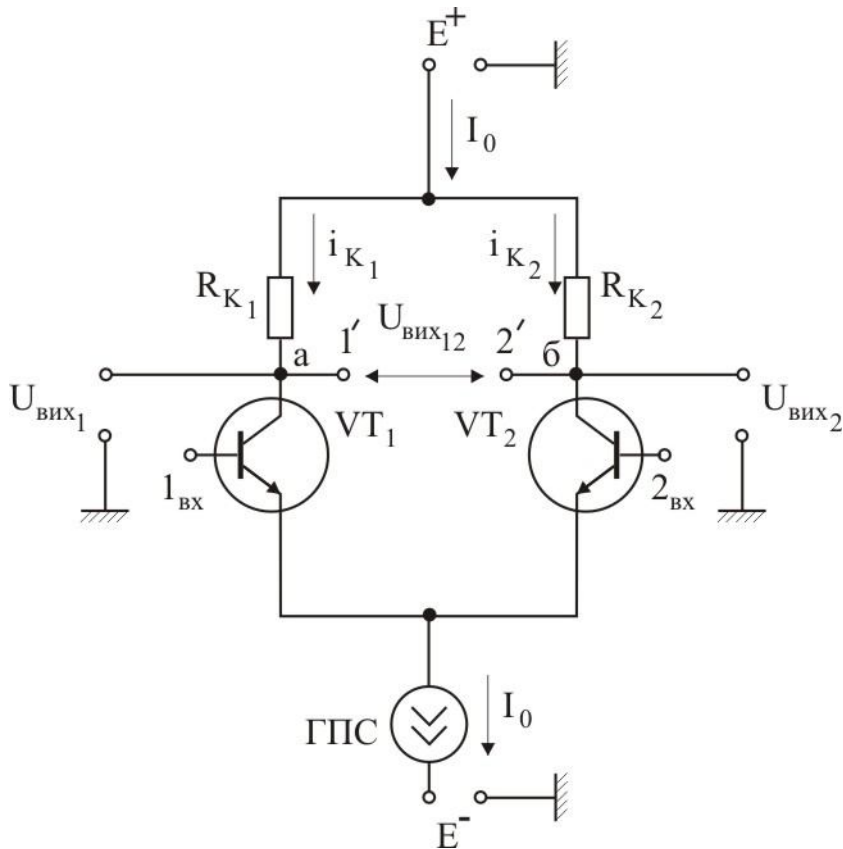


Рис.85

Типова схема складається з двох каскадів, у яких використовується загальний емітерний резистор R_e . Елементи схеми утворюють міст, в одну діагональ якого вмикаються резистори R_{K1} і R_{K2} , а в другу – транзистори VT_1 і VT_2 . Необхідними умовами для нормальної роботи ДП є рівність резисторів $R_{K1} = R_{K2}$ і ідентичність параметрів VT_1 і VT_2 , тобто вона повинна бути повністю симетричною. В цьому випадку в початковому стані (до надходження вхідного сигналу) міст буде повністю збалансованим, а напруга на його виході буде дорівнювати нулю (примітка: умовою балансу моста є рівність добутку опорів протилежних плечей, тобто в нашому випадку $R_{K1} R_{заг2} = R_{K2} R_{заг1}$, де $R_{заг1}$, $R_{заг2}$ – сума внутрішнього опору відповідного транзистора і R_e).

Порушення умови балансу приводить до розбалансування моста і появи вихідної напруги, пропорційної розбалансу, що виникло. Такий розбаланс може виникати, наприклад, при зміні вихідних опорів R_{VT1} і R_{VT2} , які, в свою чергу, залежать від вхідних напруг $U_{ВХ1}$ і $U_{ВХ2}$.

Можна стверджувати, що, якщо елементи схеми будуть повністю ідентичні, вихідна напруга при дії будь-яких факторів буде залишатися сталою. При наявності балансу будь-яка зміна напруги живлення не викличе зміну вихідної напруги.

Якщо параметри транзисторів ідентичні, то зміна температури приведе до однакових змін струмів обох транзисторів. В результаті абсолютне значення вихідної напруги залишиться незмінним.

Слід звернути увагу, що диференціальний підсилювач має два входи і два виходи, тобто на нього можна подавати і знімати симетричні прирощення сигналів. Тому для вихідної напруги можна записати:

$$U_{вих} = U_{вих1} - U_{вих2} = -K_1 U_{вх1} - (-K_2 U_{вх2}),$$

де K_1 - коефіцієнт підсилення каскаду на транзисторі $VT1$; K_2 - коефіцієнт підсилення на транзисторі $VT2$.

Для диференціального підсилювача в загальному випадку прирощення напруги на його входах мають протилежні знаки: $U_{вх1} = -U_{вх2}$ і $U_{вх} = U_{вх1} - U_{вх2} = 2U_{вх1}$.

Використовуючи останні вирази, одержимо:

$$U_{вих} = -U_{вх} (K_1 + K_2) / 2 = -U_{вх} K_{ДП},$$

де $K_{ДП} = (K_1 + K_2) / 2$ - коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача.

Висновок 1: коефіцієнт підсилення за напругою диференціального підсилювача при рівній температурній стабільності завжди більший за коефіцієнт підсилення в каскаді на одиночному транзисторі.

Так як для диференціального підсилювача прирощення напруги на його входах однакові і мають протилежні знаки: $U_{вх1} = -U_{вх2}$, то і викликані ними прирощення як колекторного, так і емітерного струмів також мають протилежні знаки. Зміни колекторних потенціалів обох транзисторів, викликані протилежними за знаком прирощеннями колекторних струмів, що протікають через різні резистори, приводять до появи вихідної напруги:

$$\Delta U_{вих} = \Delta I_{К1} R_{К1} - (-\Delta I_{К2} R_{К2}) = R_{К} (\Delta I_{К1} + \Delta I_{К2}).$$

На загальному емітерному резисторі зміна емітерних струмів дає відповідне прирощення:

$$\Delta U_E = R_E (\Delta I_{E1} - \Delta I_{E2}).$$

Якщо параметри обох половин диференціального підсилювача однакові, то $|\Delta I_{E1}| = |\Delta I_{E2}|$ і $\Delta U_E = 0$.

Як вже відмічалось, напруга ΔU_E відображає дію в каскаді, виконаному за схемою з загальним емітером, послідовного ВЗЗ (від'ємного зворотного зв'язку) за струмом навантаження. Відсутність цієї напруги говорить про те, що в повністю симетричному диференціальному каскаді як по постійному струму, так і по змінному, дія ВЗЗ відсутня.

На відміну від корисного сигналу, напруга, яка викликана дією різних збурюючих факторів, таких, як температурна зміна параметрів транзисторів, зміна напруги живлення, старіння елементів і т.п., діє на обидва входи

диференціального підсилювача в фазі. Такі напруги прийнято називати *синфазними*. Згідно сказаному, $U_{1\text{вх с ф}} = U_{2\text{вх с ф}} = U_{\text{вх с ф}}$.

Для синфазних сигналів (по аналогії, як ми зробили вище), можна записати:

$$U_{\text{вих с ф}} = -U_{\text{вх с ф}} K_1 - (-U_{\text{вх с ф}} K_2) = -U_{\text{вх с ф}} (K_1 - K_2) = -U_{\text{вх с ф}} K_{\text{с ф}}.$$

Так як маємо різницю коефіцієнтів підсилення і враховуючи, що вони однакові (дестабілізуючі фактори однаково впливають на перший і другий транзистори при їх повній ідентичності), то з одержаного виразу випливає висновок, що вже був зроблений раніше:

Висновок 2: при однакових параметрах обох половин схеми вихідна напруга диференціального підсилювача не залежить від дії зовнішніх дестабілізуючих факторів.

В реальному підсилювачі із-за неминучої асиметрії схеми $K_1 \neq K_2$ і тому відбувається тільки часткова компенсація зміни вихідної напруги, яка викликана дією зовнішніх дестабілізуючих факторів. Причому, чим ближче властивості елементів, що входять до схеми, тим менший дрейф нуля каскаду.

Ступінь компенсації дрейфу нуля прийнято характеризувати коефіцієнтом заглушення синфазних вхідних напруг диференціального підсилювача.

Під коефіцієнтом заглушення вхідних синфазних напруг розуміють відношення прирощень синфазного і диференціального вхідних напруг, що приводять до однакової зміни вихідної напруги диференціального підсилювача.

Згідно даному визначенню $U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} K_{\text{УК}} = U_{\text{вх с ф}} K_{\text{с ф}}$, звідки:

$$K_{\text{п с ф}} = U_{\text{вх с ф}} / U_{\text{вх}} = K_{\text{УК}} / K_{\text{с ф}}.$$

Величина $K_{\text{п с ф}}$ в сучасних диференціальних підсилювачах досягає 10 000 ... 100 000.

Операційний підсилювач

Сучасний етап розвитку електроніки характеризується тим, що при проектуванні електронних засобів різного призначення використовують не дискретні елементи (транзистори, діоди, резистори, конденсатори і т.п.), а закінчені функціональні вузли, виконані у вигляді інтегральних схем (ІС). Це дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики апаратури, підвищити її надійність. Розглянемо найбільш розповсюджену аналогову інтегральну схему - операційний підсилювач.

Операційний підсилювач (ОП) є багатокаскадним підсилювачем постійного струму, що задовольняє наступним умовам:

- коефіцієнт підсилення за напругою $K_{\text{У}}$ прямує до нескінченності;

- вхідний опір прямує до нескінченності (а це значить, що вхідний струм повинен бути рівним нулю);
- вихідний опір прямує до нуля (а це значить, що навантаження не повинно впливати на вихідну напругу);
- частотний діапазон підсилюваних сигналів повинен простиратися від сталої напруги до дуже високих частот;
- якщо вхідна напруга дорівнює нулю, то вихідна напруга теж дорівнює нулю.
- оскільки коефіцієнт підсилення дуже великий, то при скінченному значенні вихідної напруги на його вході повинна бути близькою до нуля.

Його умовне схематичне позначення наведено на рис.86.

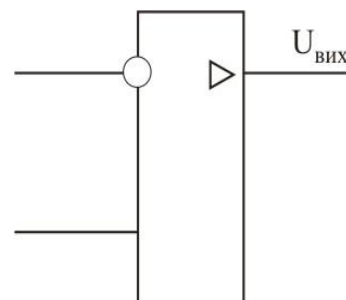


Рис. 86

Вхідне коло ОП звичайно виконується за диференційною схемою, а це значить, що вхідні сигнали можна подавати на будь-який з двох входів, один з яких змінює полярність вихідної напруги і тому називається інвертувальним, а другий не змінює полярності вихідної напруги і називається – неінвертувальним (тобто фазові відношення вхідного і вихідного сигналів для різних входів відрізняються).

Інвертувальний вхід можна позначати кружечком або писати біля нього знак (+).

Вихідна напруга ОП $U_{вих}$ пов'язана з вхідними напругами $U_{вх1}$ і $U_{вх2}$ співвідношенням:

$$U_Y = K_U (U_{вх2} - U_{вх1}),$$

де K_U – власний коефіцієнт підсилення за напругою.

Різницю напруг $(U_{вх2} - U_{вх1}) = U_{диф}$ – називають диференціальним вхідним сигналом.

Тому можемо дати інше визначення ОП:

Операційним підсилювачем (ОУ) називається диференціальний підсилювач електричних сигналів, у якого вихідна напруга U_Y пропорційна різниці вхідних напруг $U_{вх1}$ і $U_{вх2}$.

Як було вже відмічено раніше, K_U повинен прямувати до нескінченності, але на практиці він обмежується значеннями $10^5 - 10^6$.

Основні параметри ОП:

1. Коефіцієнт підсилення за напругою K_U характеризує величину підсилення диференціального сигналу, що подається на входи підсилювача:

$$K_U = \Delta U_{вих} / \Delta U_{вх}.$$

2. Вхідна напруга зміщення $U_{зм}$ – це напруга, яка обумовлена в основному неідентичністю напруг емітерних переходів транзисторів вхідного диференціального підсилювача. Наявність цієї напруги приводить до порушення умови, згідно якому $U_{вих} \rightarrow 0 |_{U_{вх} = 0}$. Чисельно $U_{зм}$ дорівнює

величині напруги, яку треба прикласти до входу ОП, щоб вихідна напруга дорівнювала нулю. Типове значення $U_{зм}$ складає одиниці або десятки мілівольт.

3. Вхідний струм ($I_{вх}$) – струм, що протікає у вхідному колі ОП і необхідний для забезпечення необхідного режиму його роботи (типове значення – від одиниць мікроампер до декількох десятків наноампер).
4. Різниця вхідних струмів $\Delta I_{вх} = I_{вх1} - I_{вх2}$ - струм зсуву, обумовлений неоднозначністю величин коефіцієнтів підсилення транзисторів .
5. Коефіцієнт послаблення синфазного сигналу, визначається як відношення напруги синфазного сигналу, поданого на обидва входи ОП, до диференціальної вхідної напруги, яка забезпечує на виході сигнал такої ж величини, як і у випадку синфазної напруги.

$$K_{п\ c\ \phi} = U_{вх\ c\ \phi} / U_{вх} \quad \text{при} \quad U_{вих\ c\ \phi} = U_{вих\ диф}$$

Ключовий режим роботи біполярних транзисторів

Транзистор – один з найбільш розповсюджених елементів безконтактних перемикаючих пристроїв. Він виконує роль ключа, за допомогою якого можна здійснювати перемикання, комутацію різних електричних кіл схеми.

Транзистор в ключовій схемі виконує функцію безконтактного ключа в послідовному колі з резистором R_K та джерелом живлення E_K .

Транзистор, що працює в ключовому режимі, може знаходитися в двох станах: закритому(вимкненому) і відкритому(замкненому). Якість транзисторного ключа визначається залишковою напругою на транзисторі в відкритому стані, а також залишковим струмом у закритому стані.

Аналіз процесів у схемі транзисторного ключа проведемо графоаналітичним методом, скориставшись побудовою лінії навантаження m_l на постійному струмі (рис.87,б) для найпростішої схеми ключа на транзисторі р-п – р (рис.87,а).

Перший стан (точка A_1) – режим відсічки здійснюється подачею на вхід транзистора напруги додатної полярності, в цьому випадку потенціал бази буде більшим потенціалу емітера ($U_{BE} = \phi_B - \phi_E > 0 \rightarrow I_E = 0$). Напруга $U_{KE\ закр} = E_K - I_{KB0}R_K$, де I_{KB0} – зворотний струм колектора. Звичайно $I_{KB0}R_K \ll E_K$, тому можна прийняти $U_{KE\ закр} \approx E_K$. Умову відсічки транзистора можна записати у вигляді: $U_{BE} > 0$, $U_{BK} > 0$ – і внаслідок того, що хоч струм, хоч і дуже малий, через опір R_K протікає, можемо сказати, що транзистор не забезпечує повного вимкнення кола опору навантаження R_K від джерела живлення. Мале значення струму I_{KB0} є одним з критеріїв вибору транзистора для ключового режиму його роботи.

В закритому стані транзистор може знаходитися необмежено довго. Вивести його з цього стійкого стану можна тільки за рахунок зовнішніх впливів, наприклад шляхом подачі на вхід транзистора типу р-п - р імпульсу від'ємної полярності (цим ми відкриваємо емітерний перехід \rightarrow відкриваємо транзистор).

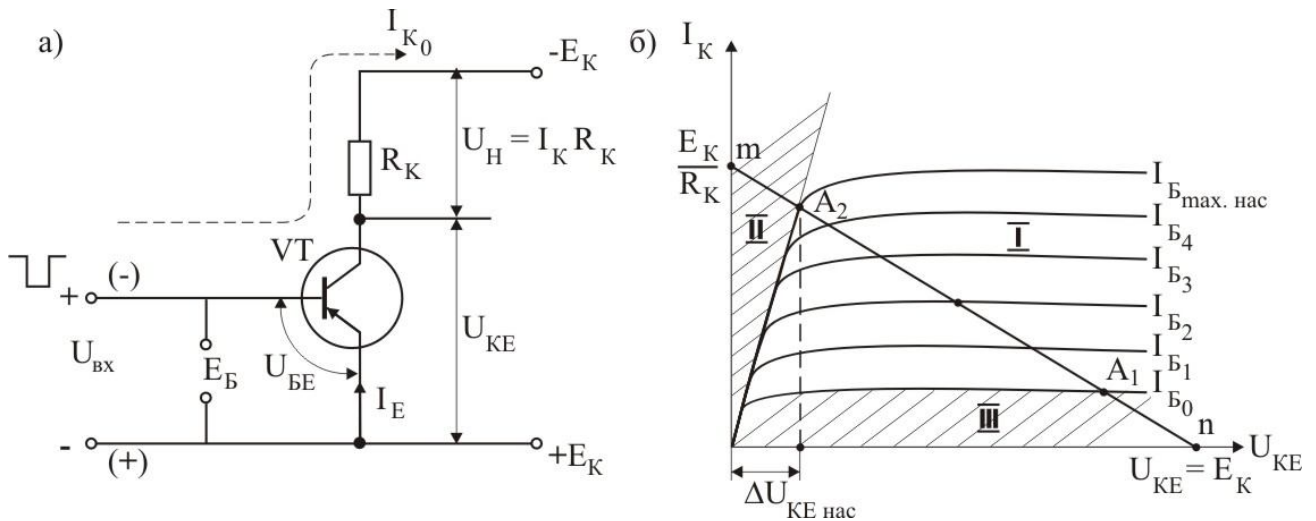


Рис.87

Другим стійким станом (точка A_2) є режим відкритого стану транзистора (режим насичення). Насичення відбувається у випадку, коли обидва транзисторних переходи знаходяться у відкритому стані. Визначимо необхідні умови для створення відкритого стану транзистора.

При $U_{BX} < 0$ струм бази i_B збільшується поступово. Збільшення i_B буде відповідати збільшенню струму колектора і переміщенню робочої точки Π з положення A_1 ввєрх по лінії навантаження mn . Напруга транзистора U_{KE} при цьому поступово зменшується. Точка A_2 при струмі бази $I_{B\max}$ характеризує “повне” відкриття транзистора. Через транзистор і резистор R_K протікає струм $I_K = (E_K - \Delta U_{KE\text{ нас}}) / R_K$, де $\Delta U_{KE\text{ нас}}$ – спад напруги (залишкова напруга) на транзисторі у відкритому стані (насиченому) стані.

Як впливає з вище сказаного, транзистор *p-n-p-типу* із режиму відсічки в режим насичення переводиться дією від’ємної вхідної напруги. Із збільшенням від’ємної вхідної напруги (потенціалу бази) зменшується вихідна напруга (потенціал колектора), і навпаки. На рис.88 показана залежність струму колектора I_K від струму бази I_B .

З цього рисунку видно, що характеристика $I_K = f(I_B)$ має злами на границях області відсічки (запирання) та насичення. Слід, також, мати на увазі, що при переході транзистора від одного стійкого стану в інший можливі перехідні процеси, які спотворюють форму імпульсних струмів і напруг в колах транзистора.

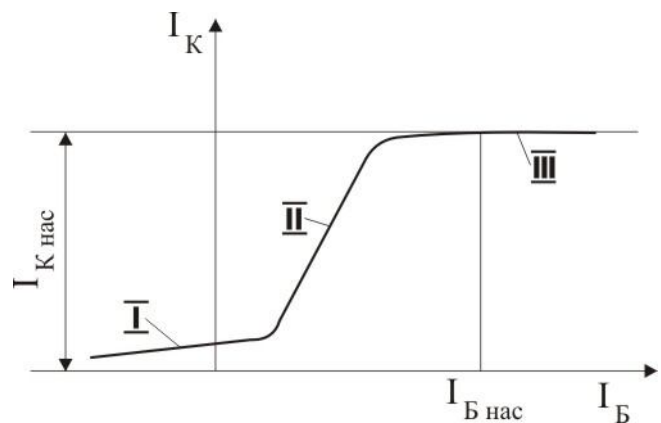


Рис.88

Логічні елементи

Логічні елементи, їх схематичне позначення. Таблиця істинності

Цифрові електронно-обчислювальні машини (ЕОМ) дозволяють не тільки проводити складні операції, але і виконувати логічні операції, пов'язані з пошуком рішень складних багатофакторних задач, таких, наприклад, як керівництво польотом космічних станцій, вибір найбільш раціональних технологічних процесів на виробництві, переклад з одного язика на інший і т.п.

При всій різноманітності логічних операцій, що виконуються ЕОМ, в основі математичного опису роботи обчислювальних пристроїв лежать достатньо прості положення математичного апарату алгебри логіки, або булевої алгебри.

В булевій алгебрі *змінні та їх функції можуть приймати тільки два значення: 0 та 1*. Над змінними можна робити три основних дії: логічне додавання, логічне множення та логічне заперечення, що відповідає логічним функціям **АБО, І, НІ**.

Логічна функція АБО – логічне додавання (диз'юнкція) позначається $y = x_1 \vee x_2$ і читається так: логічна функція y приймає значення логічної одиниці ($y = 1$), якщо логічна змінна x_1 або x_2 дорівнюють 1.

Логічна функція І – логічне множення (кон'юнкція) позначається $y = x_1 \cdot x_2$. Цей умовний запис читається так: $y = 1$ тоді і тільки тоді, коли і x_1 , і x_2 дорівнюють 1.

Логічна функція НІ – логічне заперечення (інверсія) позначається $y = \bar{x}$ і читається так: y не дорівнює x (або y є інверсією x).

Окрім простих логічних операцій використовуються і більш складні. Найважливішими серед них є:

Логічна функція $\overline{I-NI}$ – заперечення кон'юнкції (операція Шиффера). Позначається $y = \overline{x_1 x_2}$.

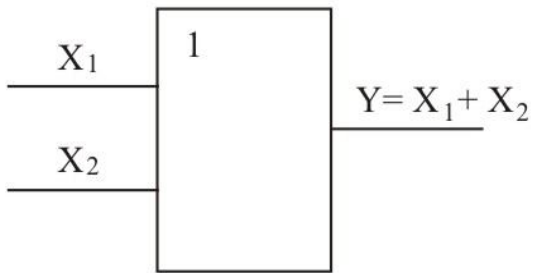
Логічна функція $\overline{A-B}$ – заперечення диз'юнкції (операція Пірса). Позначається $y = \overline{x_1 \vee x_2}$.

У відповідності до вище сказаного може бути складена таблиця станів логічних змінних (таблиця істинності).

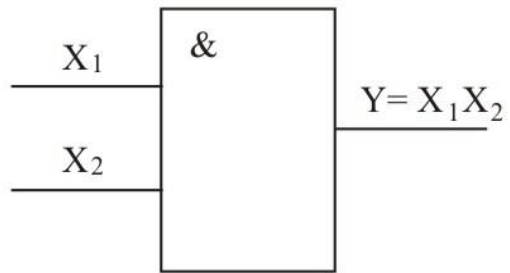
Схематичне позначення основних логічних елементів наведено на рис.89.

X_1	X_2	АБО	І	НІ	І – НІ	АБО-НІ
0	0	0	0	1	1	1
0	1	1	0	1	1	0
1	0	1	0	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0

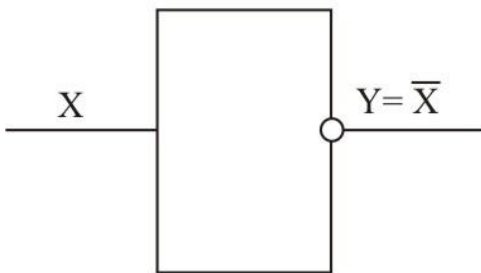
“АБО” - логічне додавання



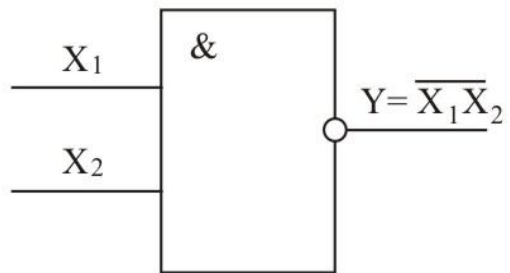
“І” - логічне множення



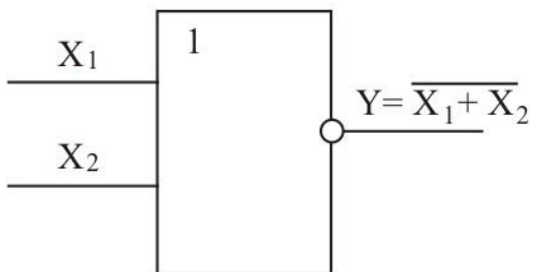
“НІ” - логічне заперечення



“І - НІ”



“АБО - НІ”



“І - АБО”

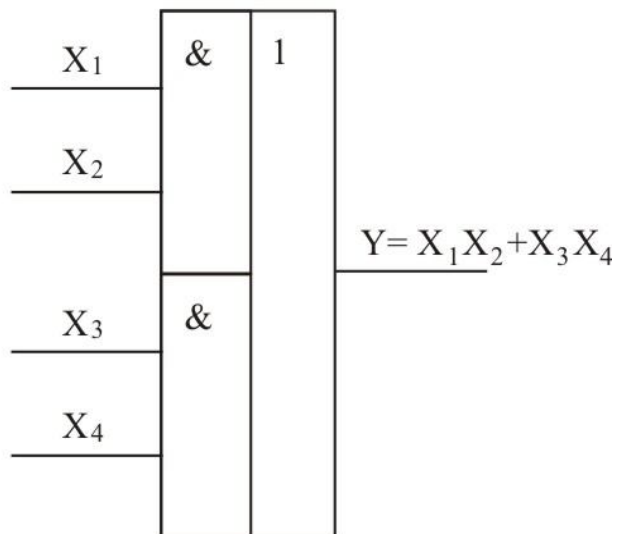


Рис.89

Найпростіші схеми реалізації логічних елементів

Будь-яка логічна функція є комбінацією найпростіших функцій - диз'юнкції, кон'юнкції, інверсії. Розглянемо найпростіші варіанти електронних схем, які реалізують логічні операції.

Схема на рис.90.а реалізує логічну функцію "АБО". Вона може мати декілька входів і один вихід.

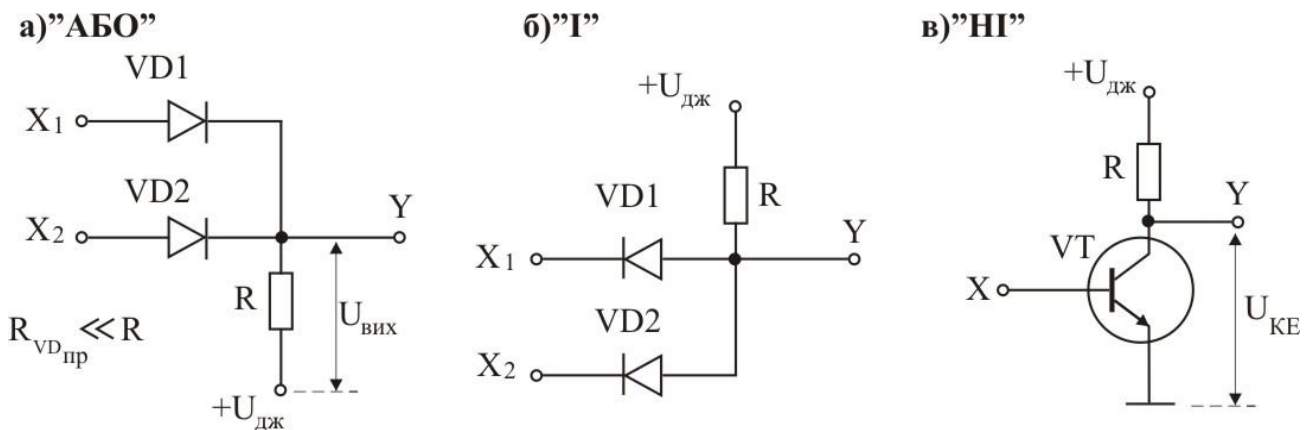


Рис.90

Для роботи схеми опір резистора R повинен бути значно більший за прямий опір діода та внутрішній опір джерела входних сигналів. В початковому стані діоди знаходяться в закритому стані. Якщо хоча б на один вхід подана додатна напруга, що відповідає логічній одиниці, то й на виході з'явиться сигнал логічної одиниці, який відповідає падінню напруги на резисторі. Для реалізації операції "АБО" необхідно виконання умови $U_{вх} > U_{дж}$ ($U_{дж}$ – напруга джерела живлення).

Схема на рис.90,б реалізує логічну функцію "І". Якщо на входи схеми одночасно подані високі напруги у вигляді імпульсів або додатних перепадів напруги, то діоди запираються і на виході схеми встановлюється високий потенціал, що відповідає логічній одиниці ($U_{вих} = U_{дж}$).

Логічна функція "НІ" реалізується за допомогою інвертора (рис.90,в). В ній транзистор працює в ключовому режимі. В початковому стані транзистор закритий, так як потенціал бази практично дорівнює нулю. Напруга на виході в цьому випадку відповідає логічній одиниці ($U_{вих} \approx U_{дж}$).

Література:

1. Малинівський С.М. Загальна електротехніка.- Л.:»Бескид Біт», 2003
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1983

3. Под ред. Герасимова В.Г. Основы промышленной электроники.- М.:Высш. шк., 1986.
4. Жеребцов Н.П. Основы электроники. . М.: 1990.
5. Гусев В.Г. Электроника. Учеб. пособ. - М.: Высш. шк. 1991. - 622с.
6. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники.-К.: Выща школа, 1989.

Контрольні питання:

1. Що називається підсилювачем і де він застосовується?
2. За якими признаками відбувається класифікація підсилювачів?
3. Накреслити схему однокаскадного підсилювача на біполярному транзисторі з загальним емітером. Які елементи утворюють вхідне і вихідне коло підсилювача? За рахунок яких елементів забезпечується режим початкового зміщення?
4. Для чого потрібна термостабілізація схеми?
5. На що впливає вибір режиму початкового зміщення?
6. Що таке «лінія навантаження»? Як вона будується?
7. Пояснити роботу однокаскадного підсилювача на біполярному транзисторі з загальним емітером в динамічному режимі.
8. Накреслити частотну і амплітудну характеристики підсилювача та проаналізувати їх.
9. Як визначити ККД підсилювача?
- 10.Що собою являє зворотний зв'язок в підсилювачах? Дати визначення додатному та від'ємному зворотному зв'язку.
- 11.Навести класифікацію схем зворотного зв'язку.
- 12.Пояснити вплив додатного і від'ємного зворотних зв'язків на параметри підсилювача.

Питання для самостійної роботи:

1. В чому полягає особливість виконання підсилювача постійного струму?
2. Що таке диференційний підсилювач?
3. Що таке операційний підсилювач і які основні властивості він має?
4. Пояснити ключовий режим біполярних транзисторів та його застосування.
5. Сформулювати основні поняття алгебри логіки. Що означають операції логічного додавання, множення та заперечення?
6. Пояснити роботу логічних елементів НІ, АБО, І.
7. Де застосовуються логічні елементи?