

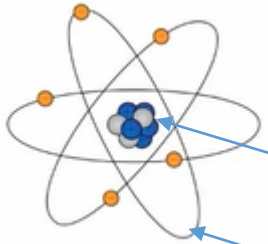
# Електротехніка та електроніка

Лек. 1

# Основні поняття

- 1. Заряд
- 2. Різниця потенціалів
- 3. Електрорушійна сила
- 4. Напруга
- 5. Електричний струм
- 6. Електричне коло
- 7. Закон Ома
- 8. Постійний струм.
- 9. Джерела електричної енергії

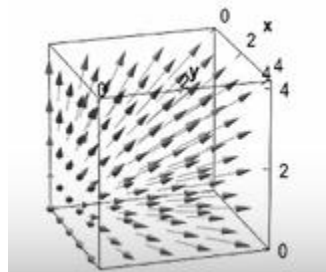
# Заряд та електричне поле



Заряд – Дуже маленька заряджена частинка як правило це електрон.

У заряду завжди є своє електричне поле

Заряд електрона величина постійна  $e = -1.6021766208(98) \times 10^{-19}$  Кл



Електричне поле – частина електромагнітного поля яка діє на заряд з певною силою

Для того щоб з'явилося те що ми називаємо електрикою повинно бути поле яке несе енергію та заряд який дозволяє виявити це поле.

## Різниця потенціалів

- Відомо, що одне тіло можна нагріти більше, а інше менше. Ступінь нагріву тіла називається його температурою. Подібно до цього, одне тіло можна наелектризувати більше іншого. Ступінь електризації тіла характеризує величину, названу електричним потенціалом або просто потенціалом тіла.

# Електризація та потенціал

- Що означає наелектризоване тіло? Це означає надати йому електричний заряд, тобто додати до нього кілька електронів, якщо ми тіло заряджаємо негативно, або відняти кілька електронів від тіла, якщо ми тіло заряджаємо позитивно. В тому і іншому випадку тіло буде мати певну ступінь електризації, тобто той чи інший потенціал, причому тіло, заряджене позитивно, має позитивний або додатній потенціал, а тіло, заряджене негативно, - негативний або від'ємний потенціал.

# Різниця потенціалів

- Різницю рівнів електричних зарядів двох тіл прийнято називати різницею електричних потенціалів або просто різницею потенціалів.
- Слід мати на увазі, що якщо два однакових тіла заряджені однойменними зарядами, але одне більше, ніж інше, то між ними також буде існувати різниця потенціалів.
- Крім того, різниця потенціалів існує між двома такими тілами, одне з яких заряджена, а інше не має заряду. Так, наприклад, якщо яке-небудь тіло, ізольоване від землі, має деякий потенціал, то різниця потенціалів між ним і землею (потенціал якої прийнято вважати рівним нулю) чисельно дорівнює потенціалу цього тіла.
- Отже, якщо два тіла заряджені таким чином, що потенціали їх неоднакові, між ними неминуче існує різниця потенціалів.

- Говорячи про різницю потенціалів, ми мали на увазі два заряджених тіла, проте різниця потенціалів можна отримати і між різними частинами (точками) одного і того ж тіла.
- Так, наприклад, розглянемо, що відбудеться в шматку мідного дроту, якщо під дією будь-якої зовнішньої сили нам вдасться вільні електрони, що знаходяться в дроті, перемістити до одного кінця дроту. Очевидно, на іншому кінці дроту вийде недолік електронів, і тоді між кінцями дроту виникне різниця потенціалів.
- Варто нам припинити дію зовнішньої сили, як електрони відразу ж, під дією сил тяжіння різнойменних зарядів, кинуться до кінця дроту, зарядженого позитивно, тобто до місця, де їх бракує, і в дроті знову настане електрична рівновага.

# Електрорушійна сила і напруга

- Для підтримки електричного струму в провіднику необхідне якесь зовнішнє джерело енергії, яке весь час підтримувало би різницю потенціалів на кінцях цього провідника.
- Такими джерелами енергії є так звані джерела електричного струму, що мають певну електрорушійну силу, яка створює і тривалий час підтримує різницю потенціалів на кінцях провідника.
- Електрорушійна сила (скорочено ЕРС) позначається буквою  $E$ . Одиницею вимірювання ЕРС служить вольт. У нас в країні вольт скорочено позначається буквою "В", а в міжнародному позначенні - буквою "V".



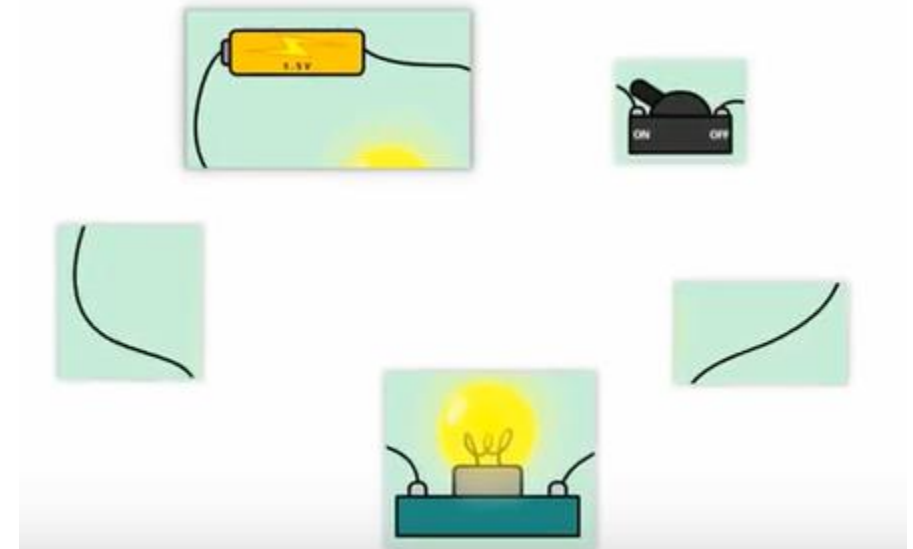
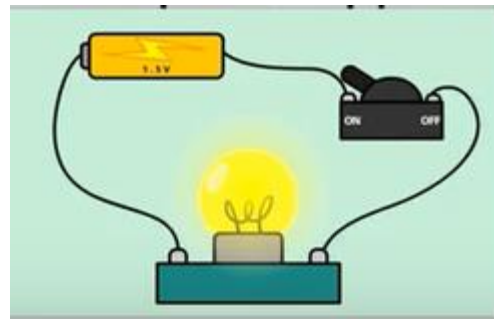
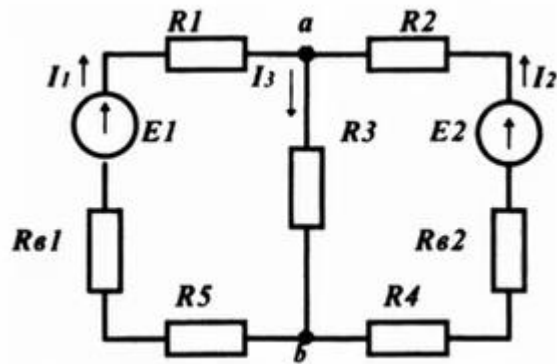
- Отже, щоб отримати безперервний перебіг електричного струму, потрібна електрорушійна сила, тоб то потрібне джерело електричного струму.
- Першим таким джерелом струму був так званий "вольтів стовп", який складався з ряду мідних і цинкових кругів, прокладених шкірою, змоченою в підкисленій воді. Таким чином, одним із способів отримання електрорушійної сили є хімічна взаємодія деяких речовин, в результаті чого хімічна енергія перетворюється в енергію електричну. Джерела струму, в яких таким шляхом створюється електрорушійна сила, називаються хімічними джерелами струму.
- В даний час хімічні джерела струму - гальванічні елементи та акумулятори - широко застосовуються в електротехніці і електроенергетиці.

- Іншим основним джерелом струму, який отримав широке поширення у всіх областях електротехніки та електроенергетики, є генератори.
- Генератори встановлюються на електростанціях і є єдиним джерелом струму для живлення електроенергією промислових підприємств, електричного освітлення міст, електричних залізниць, трамвая, метро, тролейбусів і т. п.
- Як у хімічних джерел електричного струму (елементів та акумуляторів), так і у генераторів дія електрорушійної сили абсолютно однакова. Вона полягає в тому, що ЕРС створює на затискачах джерела струму різницю потенціалів і підтримує її тривалий час.
- Ці затискачі називаються полюсами джерела струму. Один полюс джерела струму відчуває завжди недолік електронів і, отже, має позитивний (додатній) заряд, інший полюс відчуває надлишок електронів і, отже, має негативний (від'ємний) заряд.
- Відповідно до цього один полюс джерела струму називається позитивним (+), інший - негативним (-).
- Джерела струму призначені для живлення електричним струмом різних приладів - споживачів струму. Споживачі струму за допомогою провідників з'єднуються з полюсами джерела струму, утворюючи замкнутий електричне коло. Різниця потенціалів, яка встановлюється між полюсами джерела струму при замкнутому електричному колі, називається напругою і позначається буквою  $U$ .

- Одиницею вимірювання напруги, так само як і ЕРС, є **ВОЛЬТ**.
- Якщо, наприклад, треба записати, що напруга джерела струму дорівнює 12 вольт, то пишуть:  $U - 12 \text{ В}$ .
- Для вимірювання ЕРС або напруги застосовується прилад, що зветься вольтметром.
- Щоб виміряти ЕРС або напругу джерела струму, треба вольтметр підключити безпосередньо до його полюсів. При цьому, якщо електричне коло розімкнути, то вольтметр покаже ЕРС джерела струму. Якщо ж замкнути коло, то вольтметр вже покаже не ЕРС, а напругу на затискачах джерела струму.
- ЕРС, що генерується джерелом струму, завжди більше напруги на його затискачах.

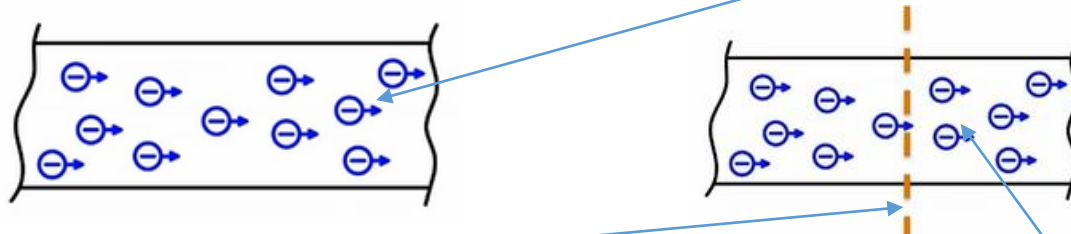
# Електричне коло

- Електричне коло - сукупність з'єднаних між собою джерел електричної енергії та навантажень, в яких може протікати електричний струм. Електро-магнітні процеси в електричному колі можна описати за допомогою понять, відомих із курсу фізики: струм, напруга, опір, провідність, індуктивність, ємність.



# Електричний струм

- Електричний струм - направлений упорядкований рух часток, які несуть електричний заряд. Носії зарядів в металах - вільні електрони, в рідинах - іони.



- Значення (сила) струму через деяку поверхню визначається зарядом, який проходить через неї за одиницю часу:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

- В електричному колі нас цікавить саме значення (сила) струму на кожній ділянці. Для стислості, термін “струм” вживають як синонім терміну значення (сила) струму. Напрямок руху додатніх зарядів на певній ділянці кола показують стрілкою, поряд з якою позначають струм літерою  $i$ . Тоді знак скалярної величини  $i$  дає інформацію про дійсний напрям руху зарядів на цій ділянці кола.

-

## Постійний струм. Джерела електричної енергії

- Постійний струм – струм, незмінний у часі (позначається великою літерою  $I$  ). Упорядкований рух носіїв зарядів у провідниках який спричиняється електричним полем, створеним в провідниках джерелами електричної енергії.
- Джерела електричної енергії перетворюють хімічну, механічну та інші види енергії на електричну.

## Електрична схема

- Електрична схема - зображення електричного кола за допомогою умовних знаків (Рис. 1).

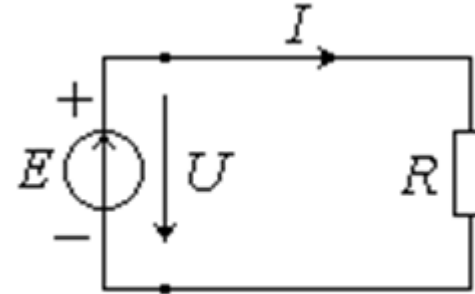


Рис. 1

Умовні позначення:  $E$  – джерело електричної енергії, електрорушійна сила (ЕРС) якого –  $E$ ,  $I$  – струм,  $R$  – навантаження, опір (резистор),  $U$  – напруга на полюсах ЕРС.

**Електричний опір  $R$**  — характеристика провідника створювати перешкоди проходженню **електричного** струму.

# Джерело електричної енергії. Резистор.

- Джерело електричної енергії - активний елемент електричного кола, тому що примушує рухатися заряди між своїми полюсами проти кулонових сил. Джерело електричної енергії характеризується електрорушійною силою ЕРС, струмом і опором. ЕРС вимірюється у *вольтах (В)*, струм в *амперах (А)*, опір в *омах (Ом)*.
- Резистор - пасивний елемент електричного кола. Елементи кола описуються вольтамперною характеристикою (ВАХ). *Вольтамперна характеристика* - залежність струму, що проходить через елемент, від напруги на ньому. ВАХ можуть бути лінійними і нелінійними.



## Вольтамперна характеристика

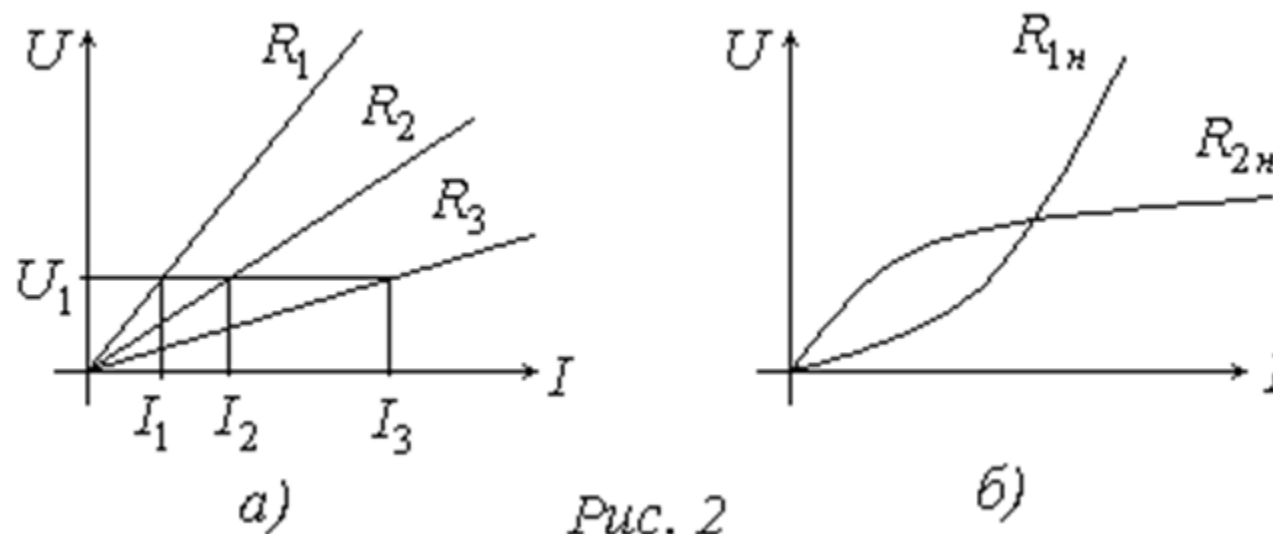


Рис. 2

- На *Рис. 2, а* показані ВАХ для лінійних резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .  
На *Рис. 2, б* показані ВАХ для нелінійних резисторів.

# Закон Ома

- Для лінійного резистора зв'язок між струмом і напругою на полюсах записується у вигляді:

$$U = R \cdot I \text{ або } I = G \cdot U, \text{ де } G = \frac{1}{R}.$$

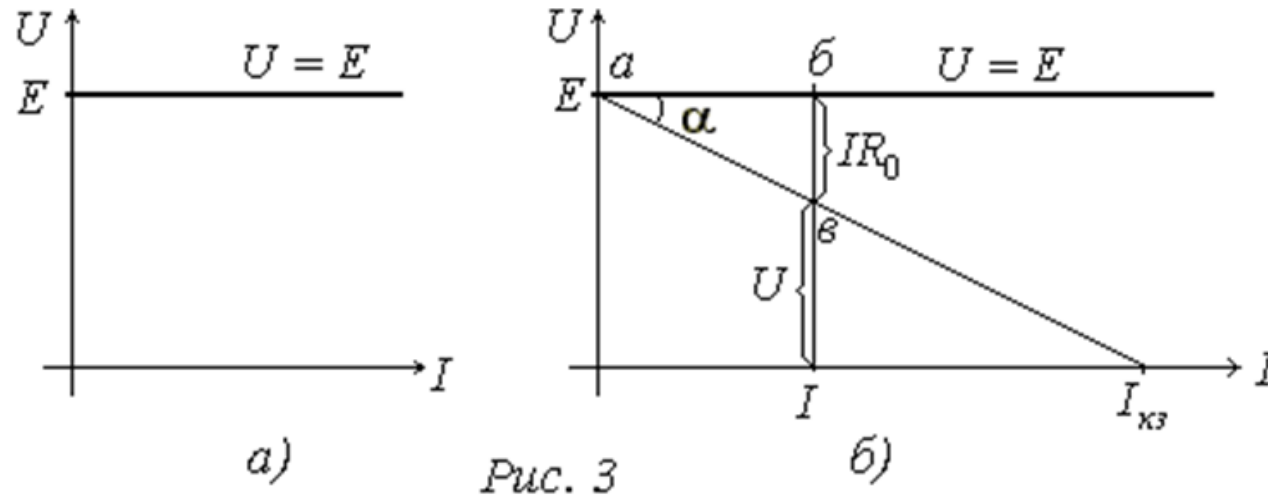
- Це закон Ома для резистивного елемента кола.
- Ом формулює свій знаменитий закон у 1827р.



Георг Симон Ом

Оскільки при одній і тій же напрузі  $U_1$  струми різні ( $I_1, I_2, I_3$ ), можна зробити висновок, що  $R_1 > R_2 > R_3$ .

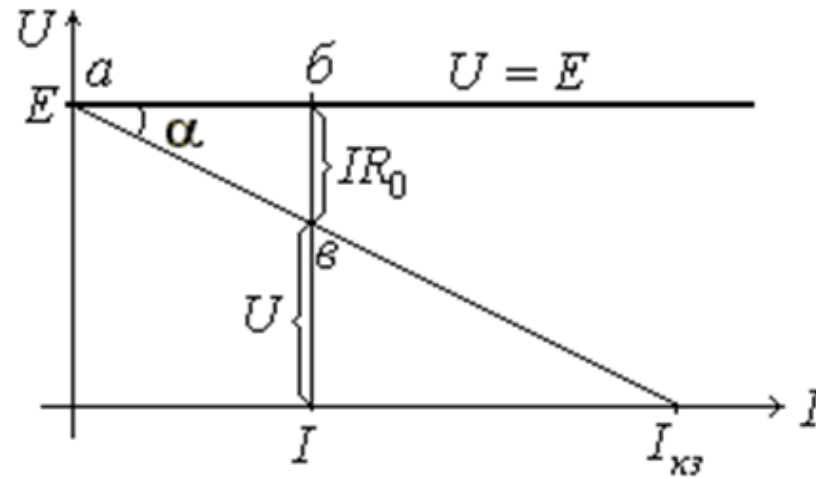
Для ідеального джерела енергії - джерела напруги ЕРС  $E = U$ , тобто напруга не залежить від струму, ВАХ показана на *Рис. 3, а*.



Реальне джерело має внутрішній опір  $R_0$ , на якому є падіння напруги  $IR_0$ , тому напруга на полюсах ЕРС залежить від струму (навантаження) *Рис. 3, б*.

При опорі навантаження  $R = 0$  в колі (*Рис. 1*) протікає струм короткого замикання  $I_{кз}$ , а напруга на клеммах ЕРС дорівнює нулю ( $U=0$ ).

Із *Рис. 3, б* видно, що  $U = E - IR_0$ . Якщо прийняти  $m_u$  - масштаб по осі напруг,  $m_i$  - масштаб по осі струмів, то можна записати  $m_u \cdot бв = IR_0$ ,  $m_i \cdot аб = I$ . Звідки :

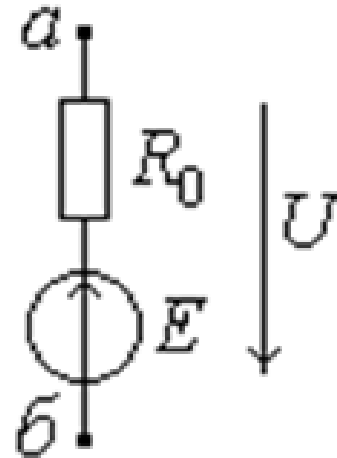


*Рис. 3*

б)

$$R_0 = \frac{m_u \cdot бв}{m_i \cdot аб} = \operatorname{tg} \alpha \cdot k, \text{ де: } k = \frac{m_u}{m_i}.$$

Схема заміщення реального джерела з внутрішнім опором  $R_0$  зображається як показано на *Рис. 4*.



*Рис. 4*

У замкненому електричному колі (Рис.5) протікає струм  $I$ . Напругу  $U$ , що дорівнює різниці потенціалів між точками  $a$ ,  $b$  -  $U = \varphi_a - \varphi_b$  можна визначити за двома шляхами:

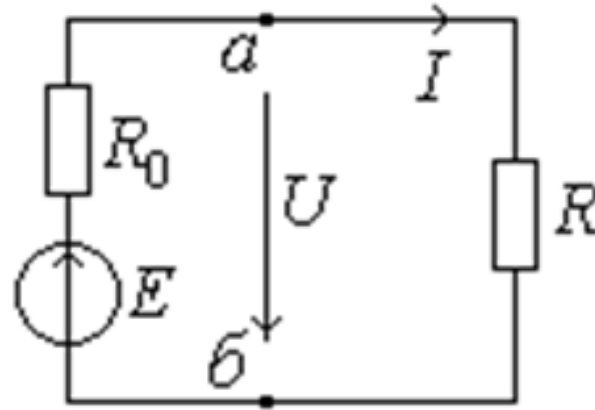


Рис. 5

$$U = IR; \text{ або } U = E - IR_0; \text{ отже } IR = E - IR_0; E = IR + IR_0.$$

$$\text{Струм у колі: } I = \frac{E}{R + R_0}.$$

# **1.2 Структура электричного кола. Закопи Киргхофа.**

# План лекції

- Вітка електричного кола
- Вузол електричного кола
- Граф для кола. Структурні елементи графа:
- Шлях. Контур. Дерево. Вітки зв'язку. Перетин. Головний контур. Головний перетин.
- I-й закон Кірхгофа (для струмів).
- II -й закон Кірхгофа (для напруг).



- Кожен елемент електричного кола має, як мінімум, два зовнішні полюси, за допомогою яких він з'єднується з іншими елементами. Електричне коло утворюється об'єднанням полюсів елементів, які входять до його складу.
- Аналіз електричного кола зводиться до визначення струмів і напруг всіх його елементів, якщо відомі параметри і спосіб з'єднання елементів між собою (структура, топологія).
- З метою зменшення в розрахункових рівняннях кількості струмів і напруг для опису структури (топології) кола вводяться поняття : *вітка* і *вузол*.

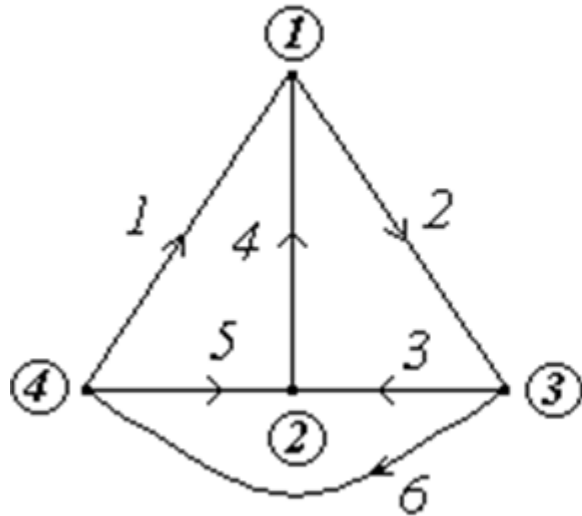
## *Вітка електричного кола*

- *Вітка* – частина кола, яка розглядається відносно двох зовнішніх полюсів і характеризується струмом і напругою між цими полюсами. До складу вітки може входити один, або більша кількість елементів.
- Основна вимога до внутрішньої структури вітки, вона повинна бути відомою, або повина легко знаходитись залежність між струмом і напругою на її зовнішніх полюсах. Найчастіше вітку утворюють декілька послідовно, або паралельно з'єднаних елементів.

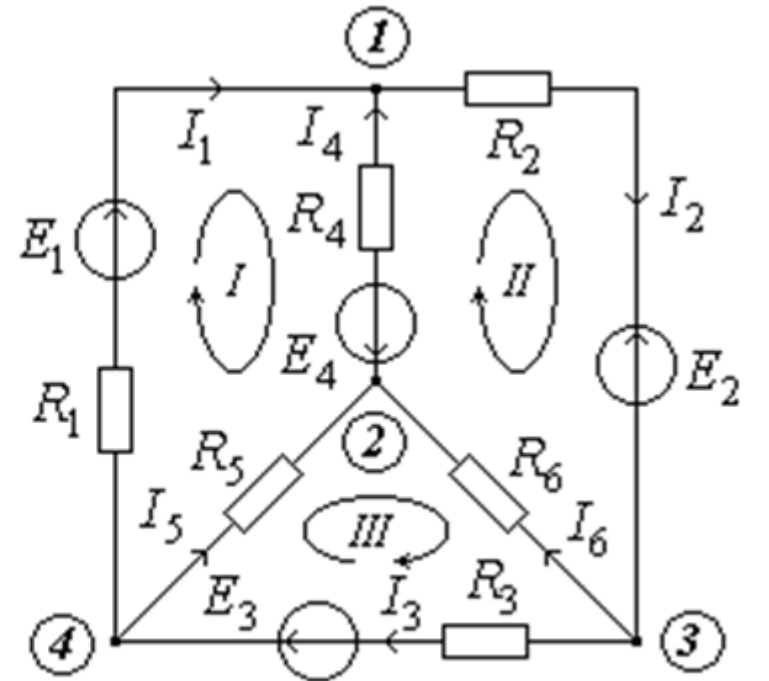
## *Вузол електричного кола*

- *Вузол* – точка, в якій з'єднуються вітки між собою.
  - Отже, надалі будемо вважати, що *задача аналізу* електричного кола *полягає в знаходженні струмів і напруг всіх його віток*.
- Структуру (топологію) електричного кола будемо розуміти як спосіб з'єднання між собою його віток. Дуже зручно показувати топологію кола у вигляді геометричної фігури – *графа*, який складається з *ребер*, що зображають вітки, і *вершин*, які зображають вузли кола.

На *Рис. 9* зображений орієнтований граф для кола (*Рис. 10*).  
 Стрілками на кожному ребрі показують напрям струму вітки і одночасно напрям відрахунку напруги цієї вітки.



*Рис. 9*



*Рис. 10*

Вітки, як і вузли, нумеруються натуральними числами. Граф називається *планарним*, якщо його можна розмістити на площині без перетину віток.

# Структурні елементи графа:

1. *Шлях* – сукупність віток, які з'єднують початковий і кінцевий вузли. Якщо між двома будь-якими вузлами графа існує шлях, то граф називається *зв'язаним*, інакше *не зв'язаним*.
  2. *Контур* – замкнений шлях, в якому початковий і кінцевий вузли співпадають. Для планарного графа вводиться поняття *простий*, або *елементарний контур* (вічко) – це контур, який не охоплює жодної вітки. Наприклад, на *Рис. 9* прості контури утворюються вітками: 1-4-5, 2-3-4, 3-5-6.
- *Дерево* – сукупність віток, що з'єднують всі вузли, але не створюють жодного контура. На *Рис. 11, а, б, в* показані суцільними лініями три дерева того ж самого графа. Очевидно, що кількість віток дерева у зв'язаному графі на одиницю менша кількості вузлів:  $n_{\text{д}} = n_{\text{вз}} - 1$

Всі вітки графа, які не належать дереву називаються *вітками зв'язку*, або інакше, *хордами*. На *Рис. 11, а, б, в* вони показані пунктиром.

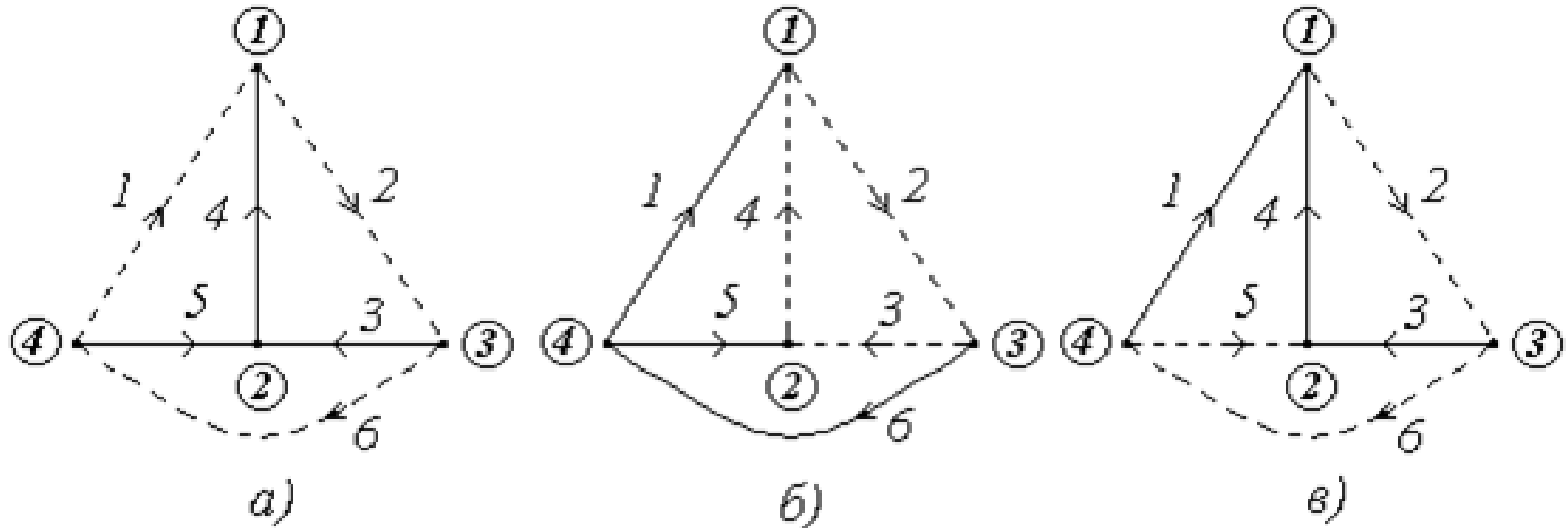
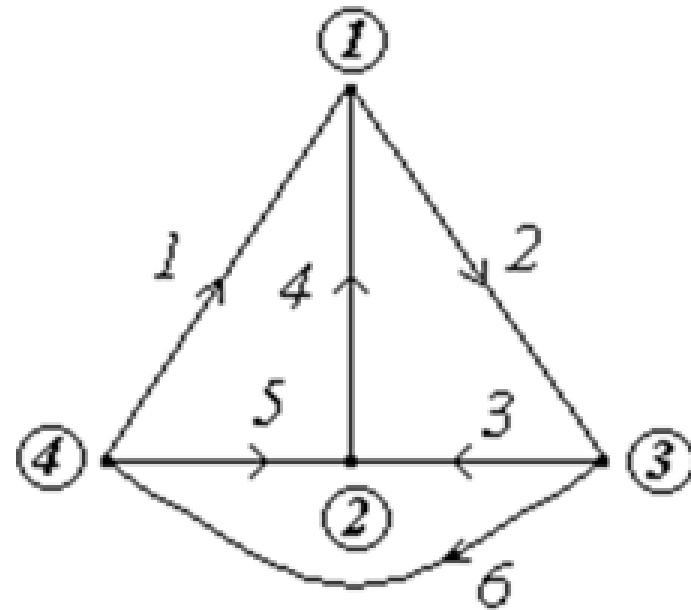


Рис. 11

Кількість віток зв'язку:  $n_z = n_e - n_d = n_e - n_{e3} + 1$

$n_e$  — загальна кількість віток графа.

4. *Перетин* – сукупність віток, при видаленні яких граф розпадається на дві, не зв’язані між собою частини. Наприклад, на *Рис. 9* вітки 6, 5, 4, 2 утворюють перетин, тому що при їх видаленні граф розпадається на дві незв’язані частини: між вузлами 1, 4 залишається вітка 1, між вузлами 2, 3 – вітка 3.



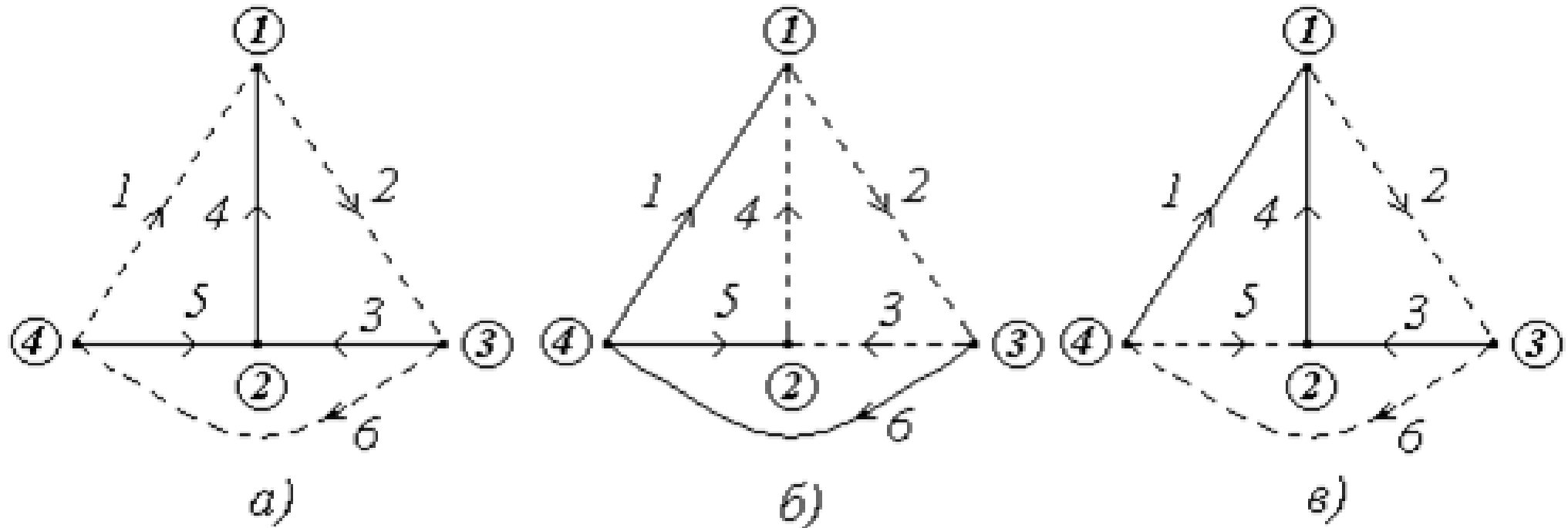
*Рис. 9*

*5. Головний контур* – контур, до складу якого входить лише одна вітка зв'язку, а всі інші – вітки дерева.

*6. Головний перетин* – перетин, до складу якого входить лише одна вітка дерева, а всі інші – вітки зв'язку.

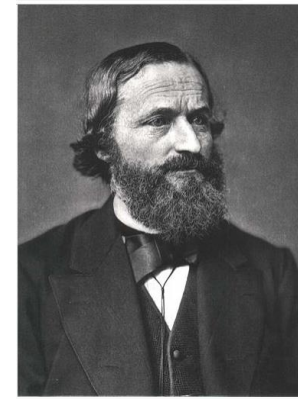


- Так, для дерева, показаного на *Рис. 11, б* головні контури утворені вітками: 2-1-6, 3-5-6, 4-1-5, головні перетини утворені вітками: 1-2-4, 5-3-4, 6-2-3. Проаналізуйте схеми кіл *Рис. 11, а, в*.



*Рис. 11*

# Закон Кірхгофа



Ім'я при народженні: Густав Роберт Кірхгоф  
нім. *Gustav Robert Kirchhoff*  
Народився: 12 березня 1824  
Кенігсберг, Східна Прусія

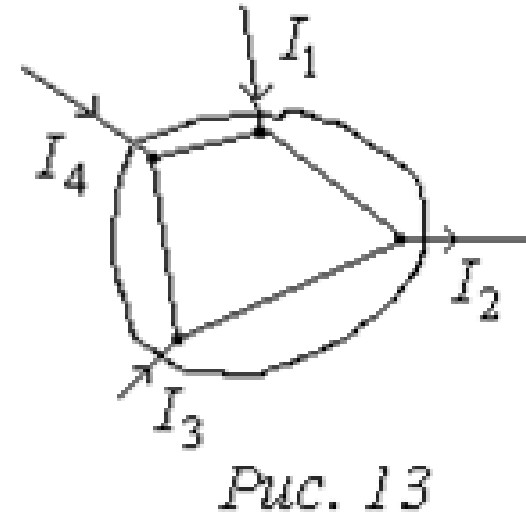
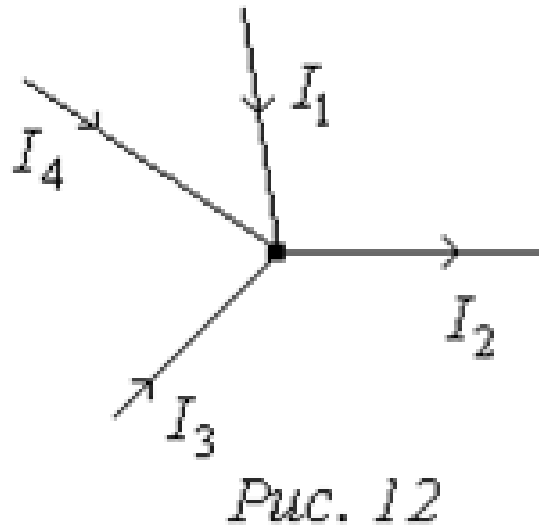
- Перший закон Кірхгофа встановлює зв'язок між сумою струмів, спрямованих до вузла електричного з'єднання (додатні струми), і сумою струмів, спрямованих від вузла (від'ємні струми). Згідно з цим законом алгебраїчна сума струмів, що збігаються в будь-якій точці розгалуження провідників, дорівнює нулю.
- Другий закон Кірхгофа встановлює зв'язок між сумою електрорушійних сил і сумою падінь напруги на резисторах замкненого контуру електричного кола. Згідно з цим законом алгебраїчна сума миттєвих значень електрорушійної сили всіх джерел напруги у будь-якому контурі електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі миттєвих значень падінь напруги на всіх резисторах того самого контуру.

# I-й закон Кірхгофа (для струмів).

- *Алгебраїчна сума струмів всіх віток, які належать вузлу (або перетину), дорівнює нулю.*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

- Для запису першого закону Кірхгофа *довільно* приймається правило знаків, наприклад: *струми, що входять у вузол беруться зі знаком «плюс» ті, що виходять - зі знаком «мінус».*
- Запис закону для вузла (*Рис. 12*), для перетину (*Рис. 13*):
- $I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0$



- Кількість незалежних рівнянь, які можуть бути складені за першим законом Кірхгофа для будь-якого кола, дорівнює кількості головних перетинів цього кола.
- Систему незалежних рівнянь за першим законом Кірхгофа одержимо також, записавши їх для незалежних вузлів кола, тобто для будь яких  $n_{\text{вз}} - 1$  вузлів кола.

Фізично перший закон Кірхгофа визначає, що в будь-якому вузлі електричного кола електричні заряди не накопичуються. Сума електричних зарядів, які надходять до вузла, дорівнює сумі зарядів, які виходять з нього за один і той самий проміжок часу. (Це є неперервність ліній струму.)

## II закон Кірхгофа (для напруг).

- *Алгебраїчна сума напруг всіх віток, які належать замкненому контуру, дорівнює нулю.*

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0$$

Якщо в одній частині рівняння залишити напруги на резисторах, а в іншій напруги на джерелах ЕРС, то другий закон Кірхгофа формулюють так:

*У замкненому контурі алгебраїчна сума напруг на опорах (резисторах) дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС контура.*

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

- Для запису другого закону Кірхгофа *довільно* вибирається напрям обходу контура, наприклад, за годинниковою стрілкою. Напруги віток, орієнтовані за напрямом обходу контура записують зі знаком «плюс», орієнтовані протилежно - зі знаком «мінус». ЕРС, які орієнтовані за напрямом обходу записуються зі знаком «плюс», орієнтовані протилежно - зі знаком «мінус».

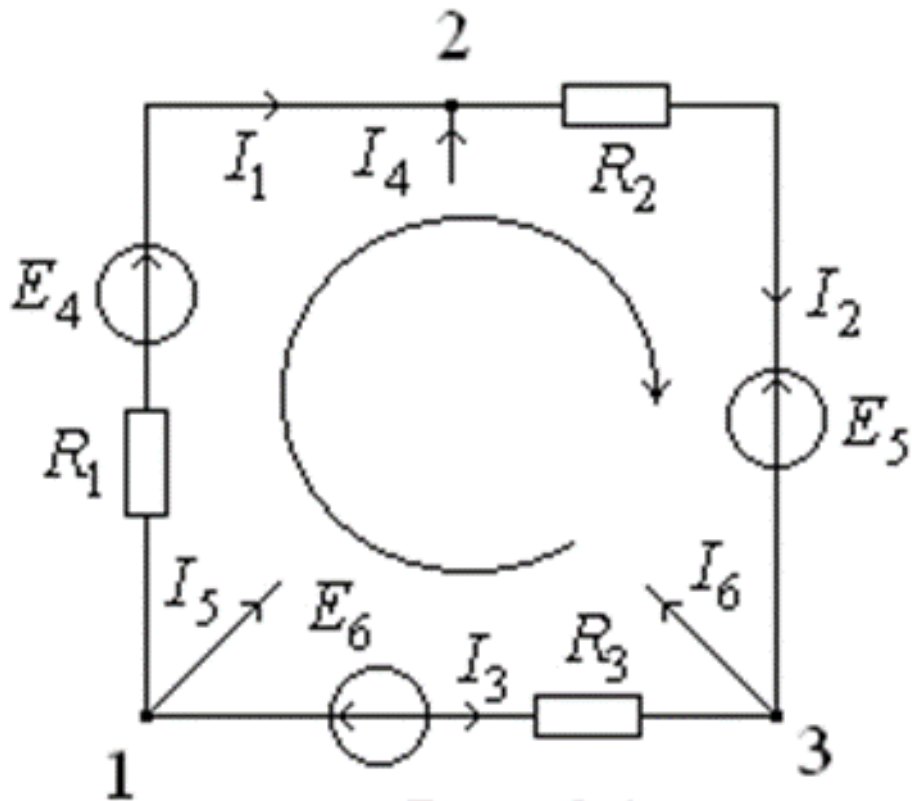


Рис 14

Для замкненого контура (Рис. 14) другий закон Кірхгофа записується так: ¶

$$\dots I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 = E_4 - E_5 + E_6 \quad \parallel$$

або так:  $U_{12} + U_{23} + U_{31} = 0 \dots \parallel$

Складаючи рівняння за другим законом Кірхгофа, необхідно, щоб були задані додатні напрями ЕРС  $E_k$  усіх джерел енергії і задатись додатними напрямками струмів  $i_k$ . Додатними напрямками спаду напруг вважають такі, які збігаються з додатними напрямками струмів.

- Кількість незалежних рівнянь, які можуть бути складені за другим законом Кірхгофа для будь-якого кола, дорівнює кількості головних контурів цього кола.
- Для планарного графа систему незалежних рівнянь за другим законом Кірхгофа одержимо, записавши ці рівняння для всіх простих контурів (вічок) кола, кількість яких дорівнює кількості віток зв'язку у планарному графі.
-



- Запишемо рівняння за законами Кірхгофа для раніше розглянутого кола (Рис. 10), для якого  $n_{\varepsilon} = 6$ ,  $n_{\varepsilon 3} = 4$ .

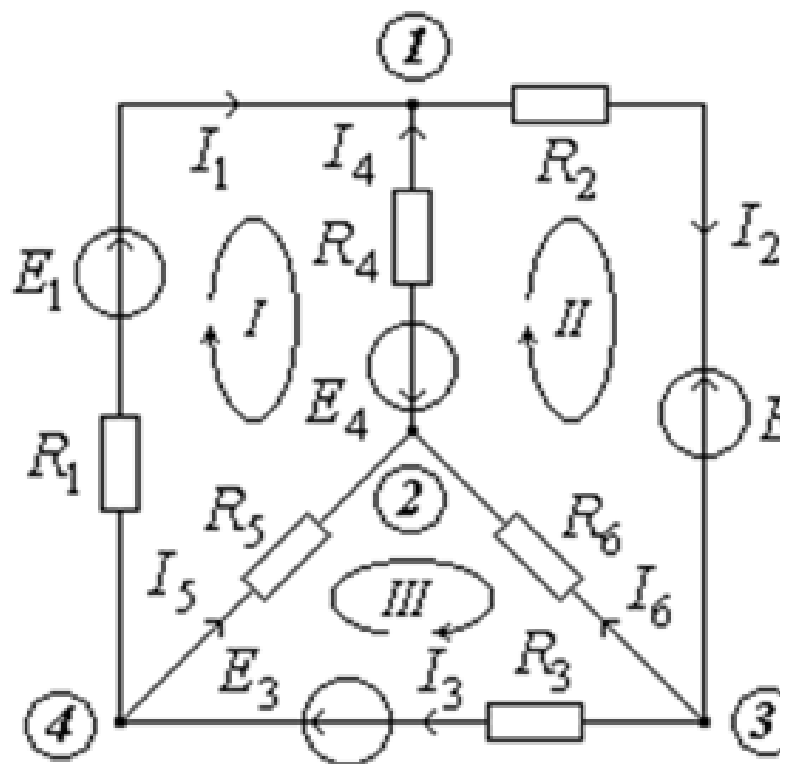


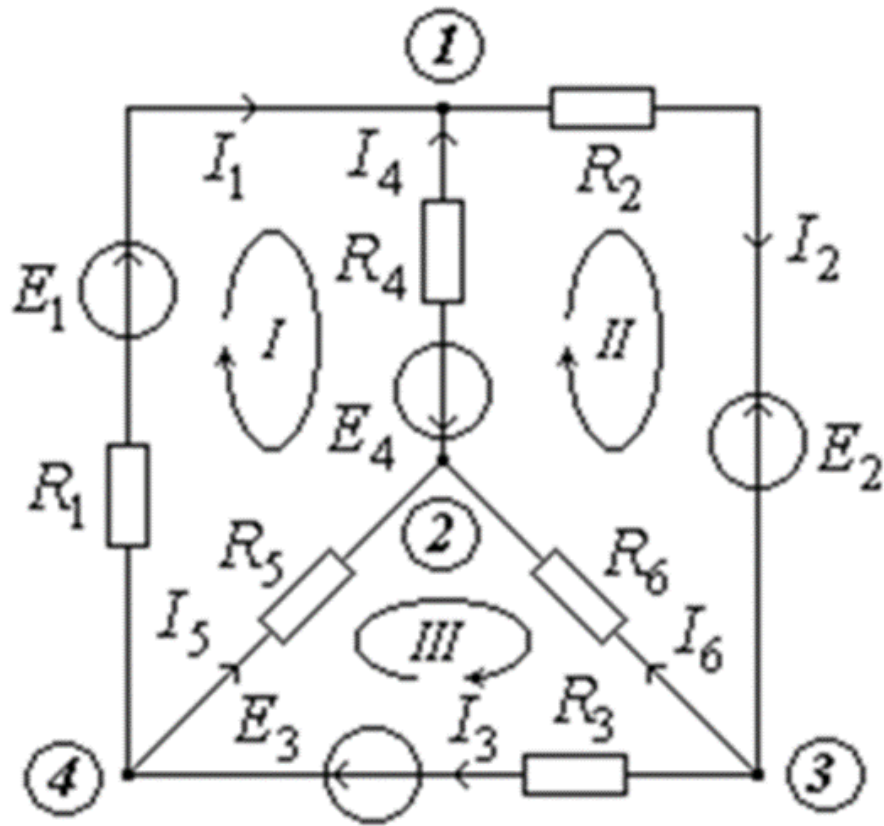
Рис. 10

За першим законом ( три незалежні вузли ):

$$\left. \begin{aligned}
 1. I_1 + I_4 - I_2 &= 0, \\
 2. I_5 + I_6 - I_4 &= 0, \\
 3. I_2 - I_3 - I_6 &= 0,
 \end{aligned} \right\} \text{ незалежні рівняння,}$$

4.  $I_3 - I_5 - I_1 = 0$  - залежне рівняння (сума трьох перших рівнянь).

- За другим законом (три незалежних контури):



- $$\left. \begin{aligned}
 1. & U_1 - U_4 - U_5 = 0, \\
 2. & U_2 + U_6 + U_4 = 0, \\
 3. & U_3 + U_5 - U_6 = 0.
 \end{aligned} \right\} \text{ незалежні рівняння,}$$
4.  $U_1 + U_2 + U_3 = 0$ , - залежне рівняння  
 (сума трьох перших рівнянь для зовнішнього контура).

Рис. 10

Висновок: для повної інформації про електричне коло досить скласти:

1.  $n_{e3} - 1$  рівнянь за першим законом Кірхгофа для незалежних вузлів (перетинів кола).

2.  $n = n_e - n_{e3} + 1$  рівнянь за другим законом Кірхгофа для незалежних контурів кола.

Енергія і потужність в  
електричних колах.  
Застосування законів Ома  
для електричних кіл  
постійного струму

# План лекції

- 1. Опір
- 2. Робота.
- 3. Енергія.
- 4. Потужність
- 5. Провідність.
- 6. Закон збереження енергії
- 7. Застосування законів Ома для електричних кіл постійного струму

# Основні формули

Опір зовнішньої ділянки кола (поза джерелами) дорівнює відношенню напруги на цій ділянці до струму у ньому:

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

Елемент електричного кола, який призначений для обмеження струму в колі, параметром якого є його електричний опір  $R$ , називається резистором.

Одиниця вимірювання опору

$$[R] = \frac{|U|}{|I|} = \frac{В}{А} = Ом.$$

Відповідно до закону Ома для всього ланцюга сила струму  $I$  в замкненому ланцюзі є відношення ЕРС  $E$  до повного опору ланцюга, тобто сумі зовнішнього  $R$  й внутрішнього  $r$  опорів:

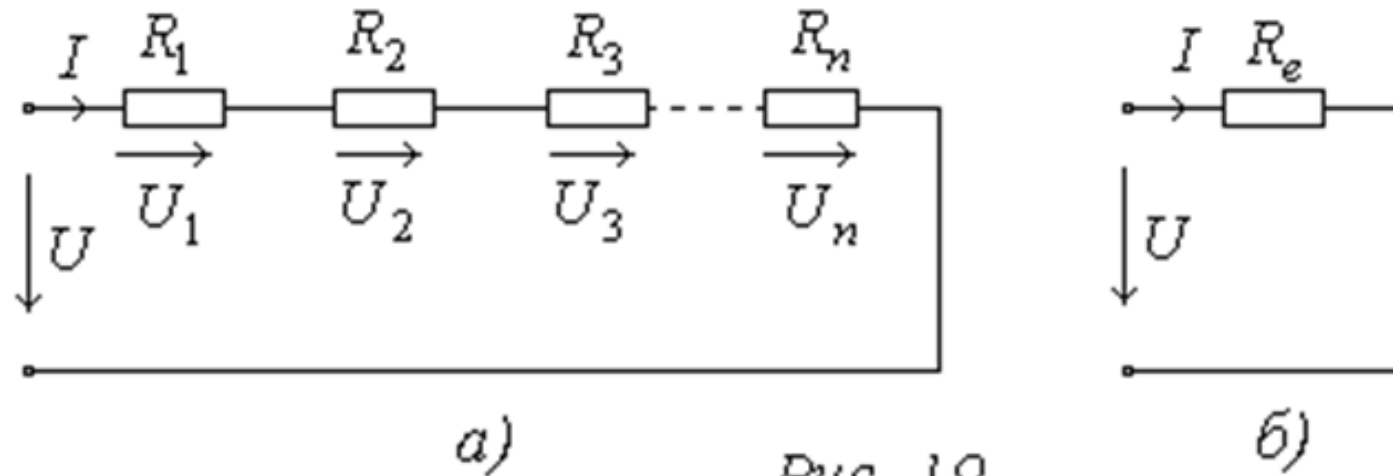
$$I = \frac{E}{R + r}. \quad (2)$$

Загальний опір послідовного ланцюга дорівнює сумі окремих опорів:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (3)$$

Примітка: Електричне коло інколи називають ланцюгом

Послідовне з'єднання резисторів, (Рис. 19 а), при якому у точках з'єднання відсутнє розгалуження, тобто через всі резистори проходить один і той же струм.



Згідно з другим законом Кірхгофа:  $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$ . Послідовне з'єднання опорів можна замінити одним еквівалентним опором  $R_e$ , (Рис. 19 б) з таких міркувань:  $IR_e = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots + IR_n$ , або:  $IR_e = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n)$ , звідки:  $R_e = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$



Опір проводу може бути знайдений за формулою

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

де  $\rho$  – питомий опір, Ом/м, який залежить від матеріалу, з якого виготовлено провід (наводиться у довідниках);  $S$  – площа перерізу проводу, м<sup>2</sup>;  $L$  – довжина проводу, м.

Опір проводів, резисторів і інших провідників електричного струму залежить від температури  $T$  навколишнього середовища:

$$R = R_{20} (1 + \alpha(T - 20^\circ)),$$

де  $R_{20}$  – опір при 20 С;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору, який залежить від виду матеріалу, з якого виготовлено провід (наводиться в довідниках).

# Провідність

Електрична провідність – це величина, зворотна до опору, тобто

$$G = \frac{1}{R}.$$

- Одиниця вимірювання провідності  $[G] = \frac{|1|}{|R|} = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См (Сименс)}.$

Загальна провідність паралельного ланцюга дорівнює сумі окремих провідностей:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Паралельне з'єднання резисторів, (Рис. 17, а), при якому всі резистори ввімкнені між двома вузлами. Та ж схема може зображатись, як показано на Рис. 17, б, чи Рис. 17, в.

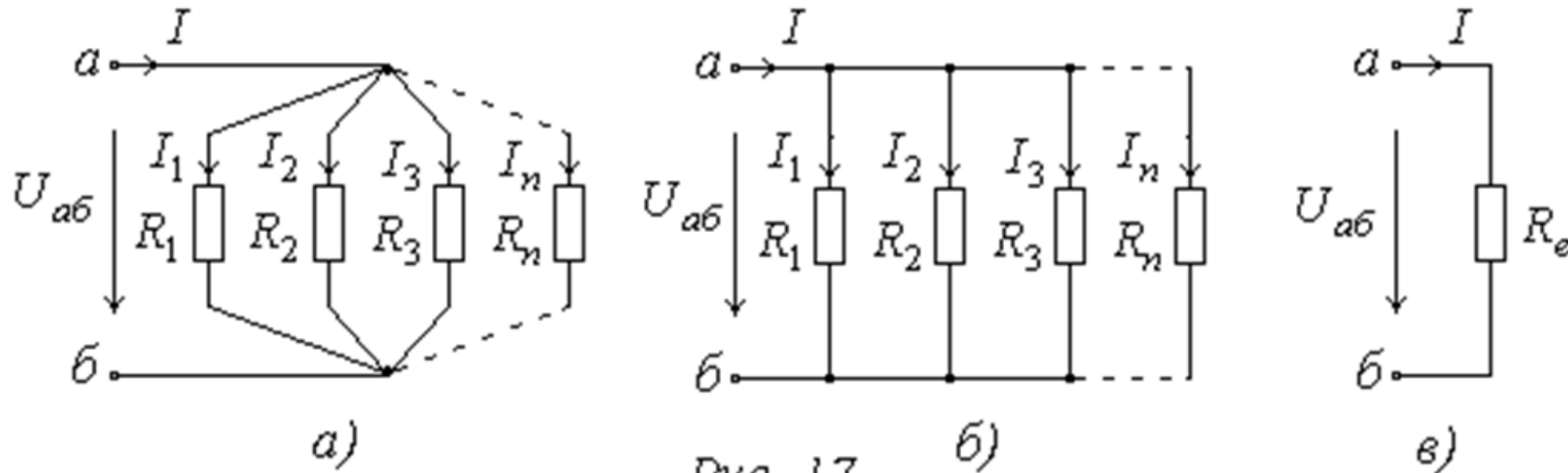


Рис. 17

Згідно з першим законом Кірхгофа  $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$ . Напруга на всіх резисторах однакова  $U = U_{ab}$  тому :

$$\frac{U}{R_e} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots + \frac{U}{R_n} \quad \text{або} \quad \frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

# Робота

З визначення ЕРС ( $E$ ) випливає, що робота (енергія) сторонніх сил з поділу зарядів у колах постійного струму, яка виконується джерелом електричної енергії за час  $t$ , дорівнює

$$A_{\text{дж}} = E Q = E I t .$$

На пасивній ділянці кола, чи, як ще говорять, на навантаженні, у приймачі електричної енергії при напрузі  $U$  та струмі  $I$  витрачається енергія

$$A_{\text{пр}} = UQ = UIt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t .$$

# Потужність

Потужність  $P$  характеризує інтенсивність перетворення енергії одного виду в іншій за одиницю часу.

Для кола постійного струму потужність джерела

$$P_{\text{дж}} = \frac{A_{\text{дж}}}{t} = EI;$$

потужність приймача

$$P_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{пр}}}{t} = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

Одиниця вимірювання потужності в колах постійного струму

$$[P] = \frac{[A]}{[t]} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

# Закон збереження енергії

На підставі закону збереження енергії потужність, що розвивається джерелами електричної енергії, повинна дорівнювати потужності, яка в зовнішній частині електричного кола перетворюється в інші види енергії:

$$\sum P_{\text{дж}} = \sum P_{\text{пр}} \quad (1.1)$$

або

$$\sum EI = \sum UI \equiv \sum I^2 R \equiv \sum \frac{U^2}{R},$$

де  $\sum P_{\text{дж}}$  – сумарна потужностей, що розвиваються джерелами;  
 $\sum P_{\text{пр}}$  – сумарна потужностей усіх приймачів і необоротних перетворень енергії всередині джерел, які мають місце через наявність у них внутрішніх опорів.

Рівняння  $\sum P_{\text{дж}} = \sum P_{\text{пр}}$  називають балансом потужності електричного кола.

Відповідно до закону збереження енергія не виникає нізвідки й нікуди не зникає, а переходить із однієї форми в іншу. Тому в будь-якому ланцюзі потужність, що розвивається джерелами електричної енергії, дорівнює потужності необоротних перетворень енергії в приймачах:

Якщо дійсний напрямок струму в електричному колі збігається з напрямком ЕРС, то джерело виробляє (генерує) електричну енергію і його потужність входить у суму  $\sum EI$  зі знаком «плюс».




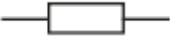







Якщо дійсний напрямок струму є протилежним напрямку ЕРС, то в цьому разі джерело працює в режимі споживача і є приймачем електричної енергії (наприклад, акумулятор у режимі заряджання). І його потужність або входить у суму  $\sum EI$  зі знаком «мінус», або додається зі знаком «плюс» до правої частини рівняння (1.1).

$$\sum P_{дж} = \sum P_{пр} \quad (1.1)$$

$$\sum EI = \sum UI \equiv \sum I^2 R \equiv \sum \frac{U^2}{R},$$



# Умовні графічні зображення деяких елементів кола

Назва елемента	Умовне зображення	Назва елемента	Умовне зображення
Джерело електричної енергії		Одиночний провідник	
Гальванічний елемент (акумулятор)		Провідники, що перетинаються без з'єднання	
Активний опір		Гальванічне з'єднання провідників	
Змінний активний опір		Однополюсний вимикач	
Ротор (якір) електричного двигуна		Двополюсний вимикач	
Лампа розжарювання		Триполюсний вимикач	
Плавкий запобіжник		Амперметр	
Ватметр		Вольтметр	

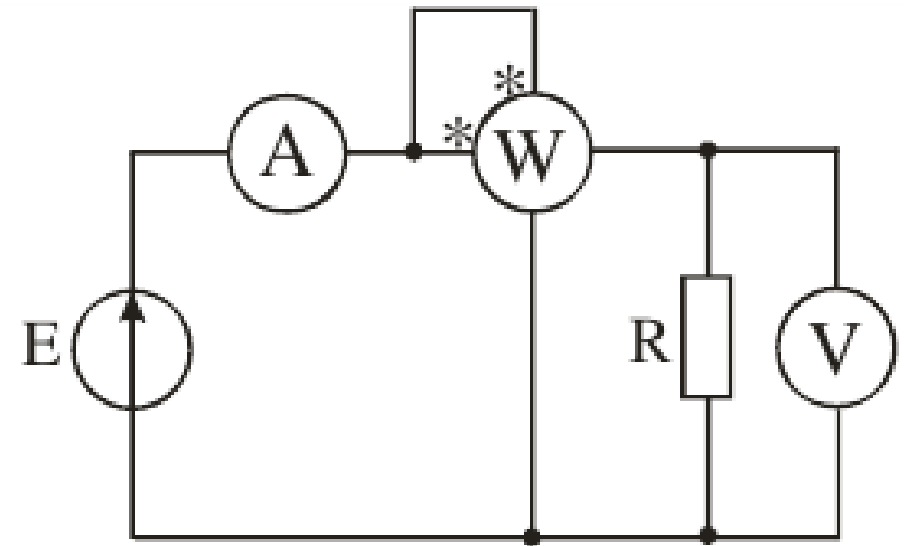
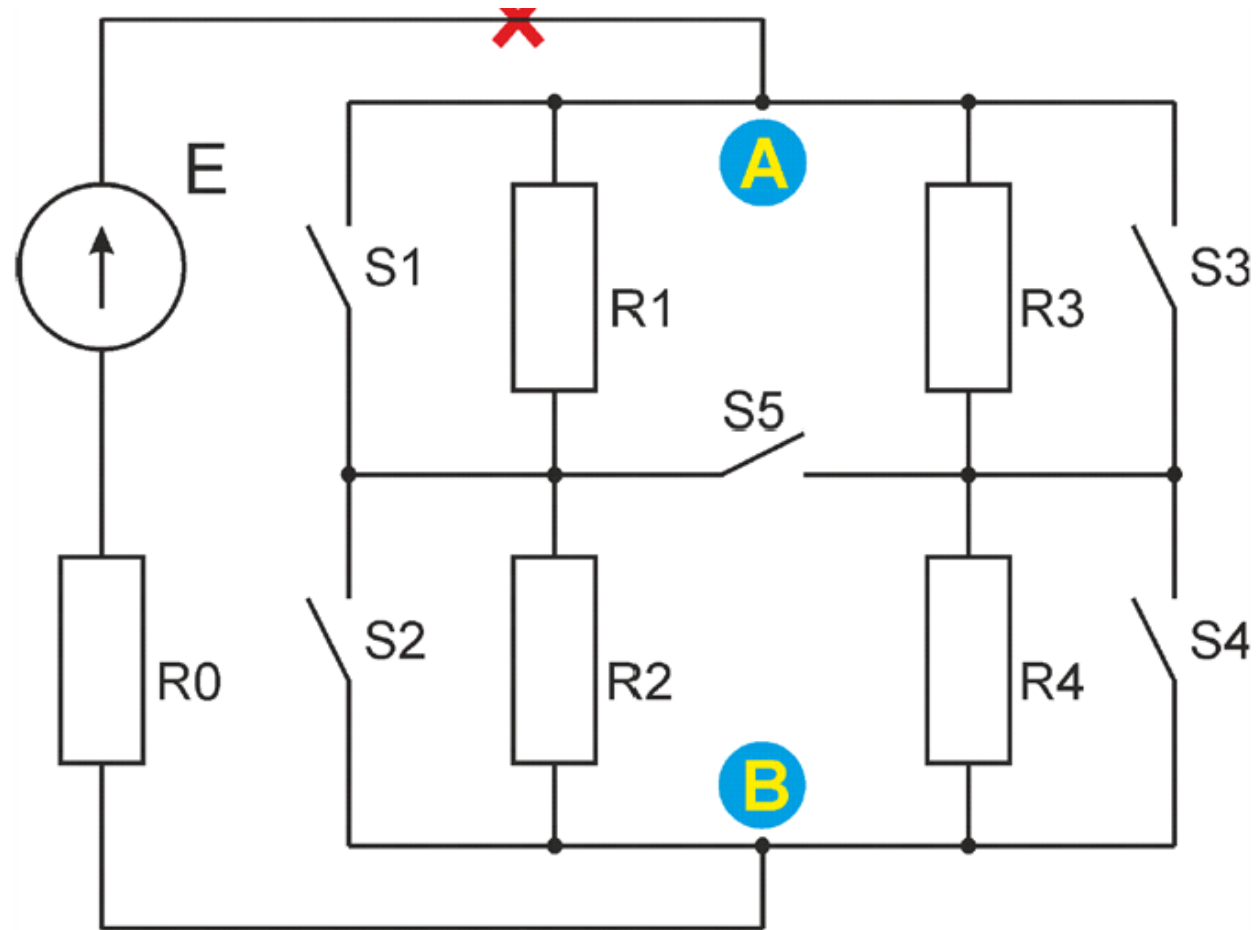


Схема для вимірювання параметрів кола постійного струму

# Задача

Для електричного кола постійного струму визначити еквівалентний опір споживача  $R_{\Sigma}$  ( $R_{AB}$ ), струм навантаження, напругу на затискачах споживача  $U_{AB}$ , потужність споживача  $P_{AB}$  і потужність джерела живлення  $P_{дж}$ , скласти баланс потужностей, побудувати зовнішню характеристику джерела живлення. Вихідні дані - положення вимикачів  $S1 - S4$ , ЕРС джерела  $E$ , внутрішній опір джерела  $R_0$ , опори резисторів  $R_1 - R_4$  для відповідних варіантів наведені в таблиці.

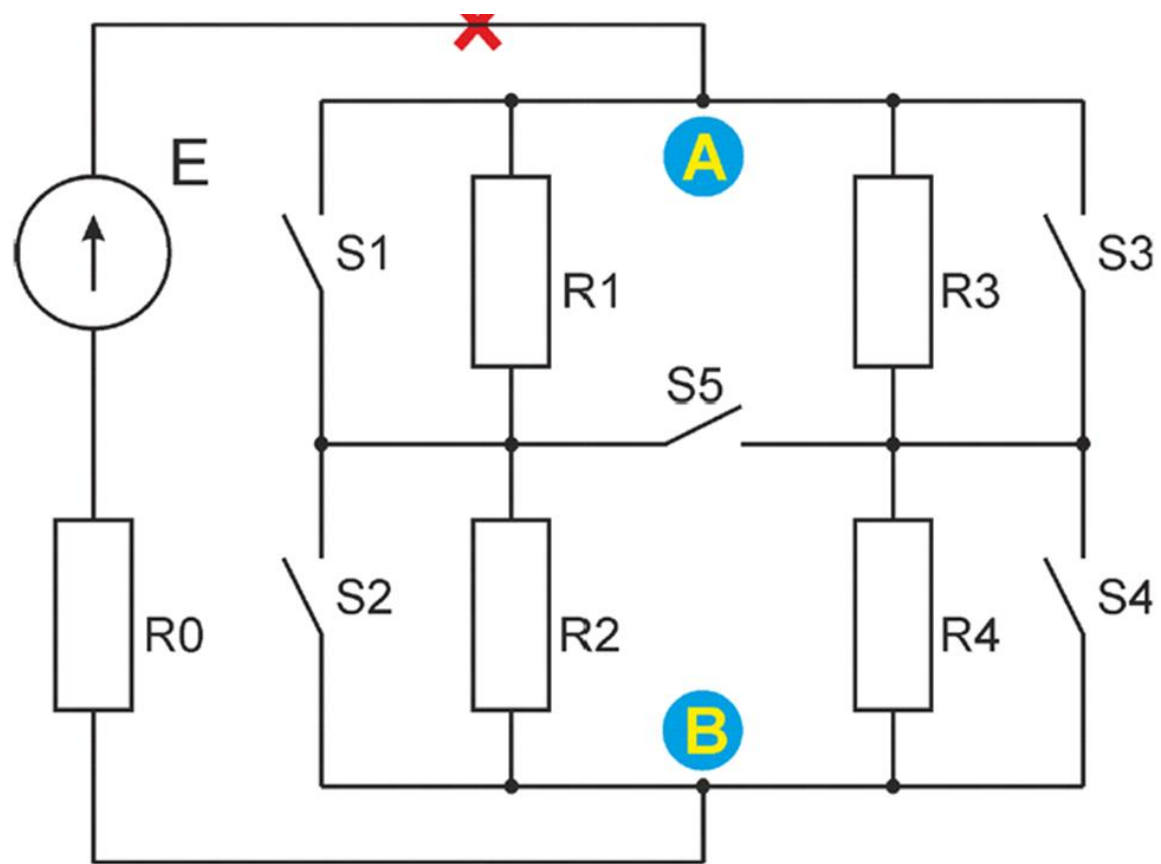


Мал. 1

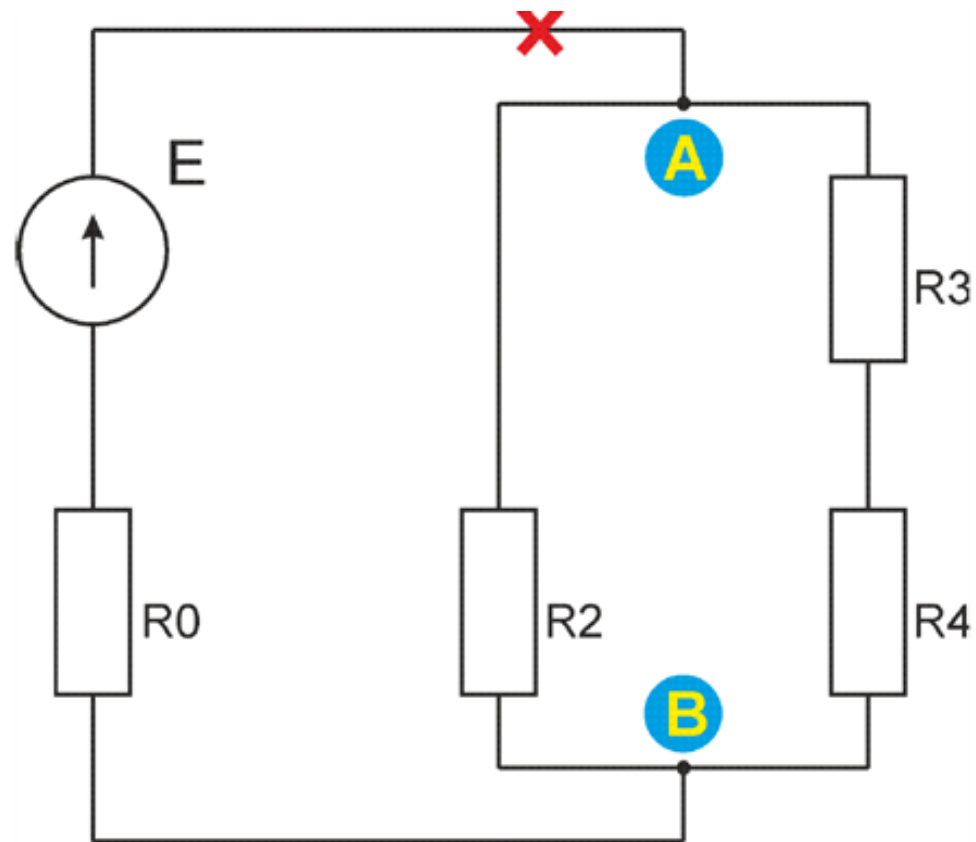
Таблиця 1

№ варіант у	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$E$ , В	$R_0$ , Ом	Замкнутий вимикач
0	25	15	6	4	12,6	0,3	S1

З урахуванням того, що в нашому випадку вимикач  $S1$  замкнений, схема кола має вигляд, представлений на мал. 2.



Мал. 1



Мал. 2.

Загальний опір послідовного ланцюга дорівнює сумі окремих опорів:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Загальна провідність паралельного ланцюга дорівнює сумі окремих провідностей:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Еквівалентний опір споживача  $\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4}$

$$R_{AB} = \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_4)}{R_2 + (R_3 + R_4)} = \frac{15 \cdot (6 + 4)}{15 + (6 + 4)} = 6 \text{ Ом.}$$

Струм навантаження, у відповідності з законом Ома для повного (замкненого) кола,

$$I = \frac{E}{R_{AB} + R_0} = \frac{12,6}{6 + 0,3} = 2 \text{ А.}$$

Напруга на затискачах споживача у відповідності з законом Ома для ділянки кола,

$$U_{AB} = I \cdot R_{AB} = 2 \cdot 6 = 12 \text{ В.}$$

Потужність споживача

$$P_{AB} = I \cdot U_{AB} = 2 \cdot 12 = 24 \text{ Вт.}$$

Потужність джерела живлення

$$P_{дж} = I \cdot E = 2 \cdot 12,6 = 25,2 \text{ Вт.}$$

Втрати у джерелі (потужність, яка втрачається у джерелі живлення на його внутрішньому опорі, переходить у тепло)

$$\Delta P_{дж} = I^2 R_0 = 2^2 \cdot 0,3 = 1,2 \text{ Вт.}$$

Перевіряємо баланс потужностей (потужність, яка виробляється у джерелі електричної енергії, має дорівнювати потужності, яка витрачається в колі):

$$P_{дж} = P_{ав} + \Delta P_{дж};$$

$$25,2 = 24 + 1,2;$$

$$25,2 = 25,2.$$

Баланс зійшовся, отже коло розраховане вірно.

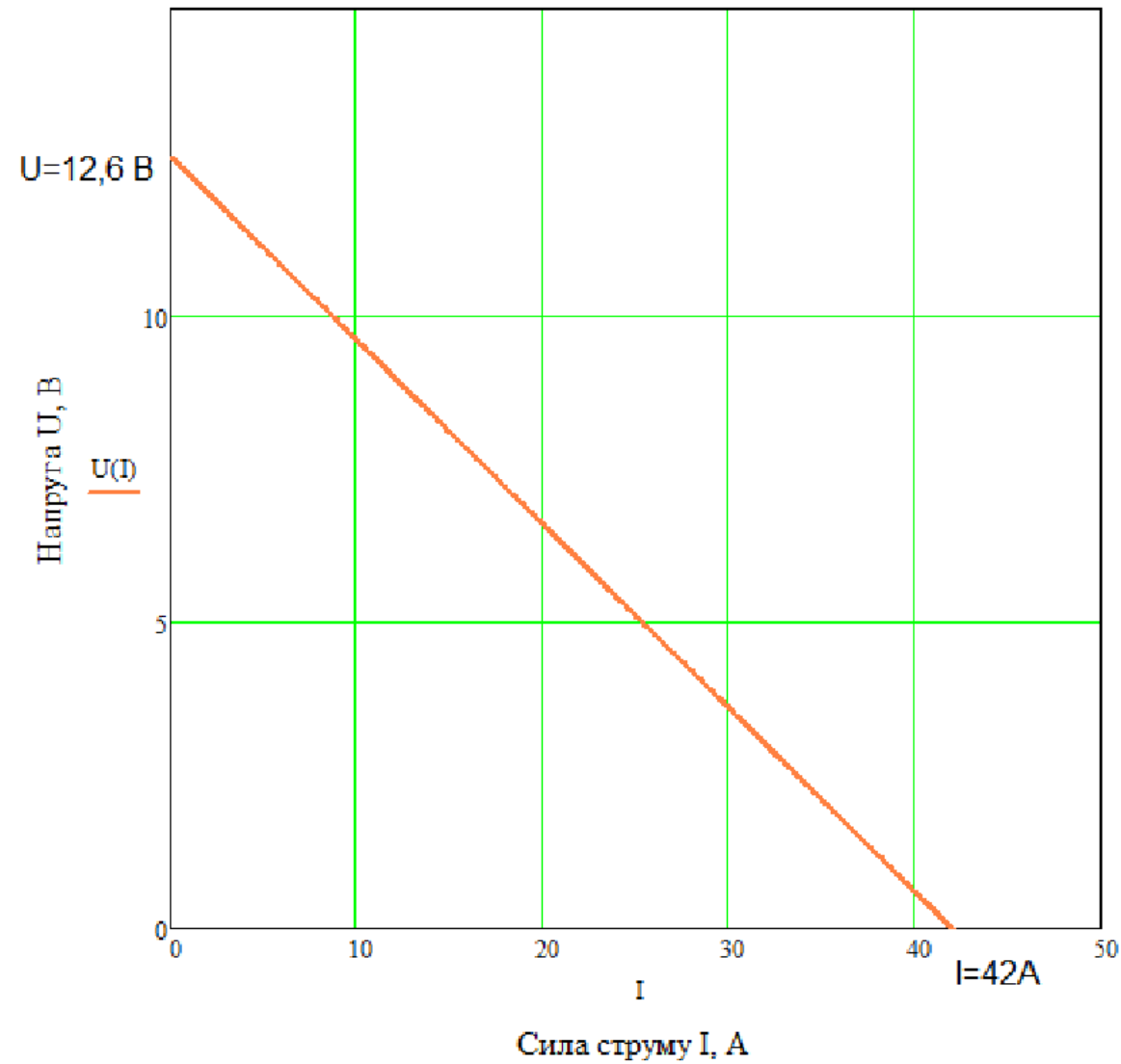


## Зовнішня воль-амперна характеристика джерела живлення

Зовнішня характеристика джерела живлення являє собою залежність напруги на затискачах джерела від струму навантаження  $U = f(I)$ . При  $I = 0$  напруга досягає найбільшого значення напруги холостого ходу  $U_{ХХ} = E = 12,6$  В, тобто ЕРС. Максимального значення струм досягає при короткому замиканні

$$I_{кз} = \frac{E}{R_0} = \frac{12,6}{0,3} = 42 \text{ А.}$$

Зовнішня характеристика джерела живлення



Мал. 3.

Відповідь.  $R_{AB} = 6$  Ом,  $I = 2$  А,  $U_{AB} = 12$  В,  $P_{AB} = 24$  Вт,  $P_{ДЖ} = 25,2$  Вт.

# Електричні кола змінного струму

# План лекції

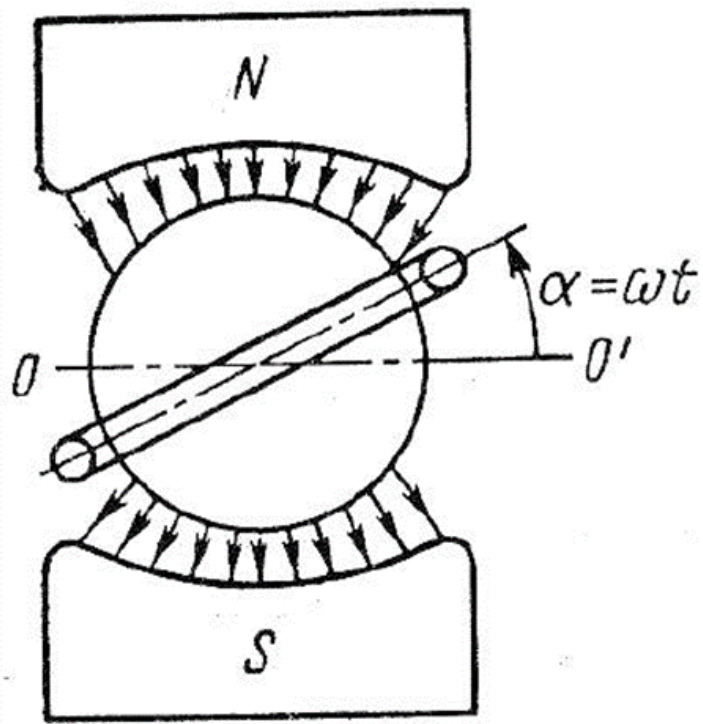
- 1. Основні теоретичні положення.
- 2. Коло змінного струму з індуктивністю.
- 3. Коло змінного струму з резистивним елементом.
- 4. Коло змінного струму з конденсатором.
- 5. Коло змінного струму з індуктивністю.

# Основні теоретичні положення

**Змінним** називають струм, зміна якого за значенням і напрямком повторюється періодично через рівні проміжки часу.

Широке застосування змінного струму в різних областях техніки пояснюється легкістю його одержання й перетворення, а також простотою устрою генераторів і двигунів змінного струму, надійністю їх роботи й зручністю експлуатації.

Розглянемо принцип дії найпростішого генератора змінного струму.



Мал. 1. Модель генератора  
змінного струму

Між полюсами електромагніту або постійного магніту (мал. 1) в одноріднім магнітнім полі рівномірно обертається з *кутовою швидкістю*  $\omega$  рамка площею  $S$ .

Магнітний потік через рамку

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

(1)

де  $\alpha$  - кут між нормаллю до рамки й вектором магнітної індукції  $\vec{B}$ .

Оскільки при рівномірній обертанні рамки кутова швидкість  $\omega = \frac{\alpha}{t}$ , то кут  $\alpha$  буде змінюватися за законом  $\alpha = \omega t$ , і формула (1) прийме вигляд

$$\Phi = BS \cos \omega t \quad (2)$$

Величину  $\omega$  також називають *круговою частотою*.

Через те що при обертанні рамки магнітний потік, що її перетинає, увесь час міняється, то за законом електромагнітної індукції в ній буде ЕРС індукції

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t, \quad (3)$$

де  $E_m = BS\omega$  - *амплітуда* (максимальне значення) синусоїдальної ЕДС, що виникає в рамці.

Якщо до затискачів генератора підключити навантаження, то через неї піде струм, який також буде змінюватися за синусоїдальним законом. Графік синусоїдального струму  $i = I_m \sin \omega t$  представлений на мал. 2. По осі ординат відкладають струм  $i$ , по осі абсцис - кут  $\alpha = \omega t$  або час  $t$ .

Значення  $e = E(t)$  змінної ЕДС (а також струму й напруги) у поточний момент часу називається *миттєвим значенням*.

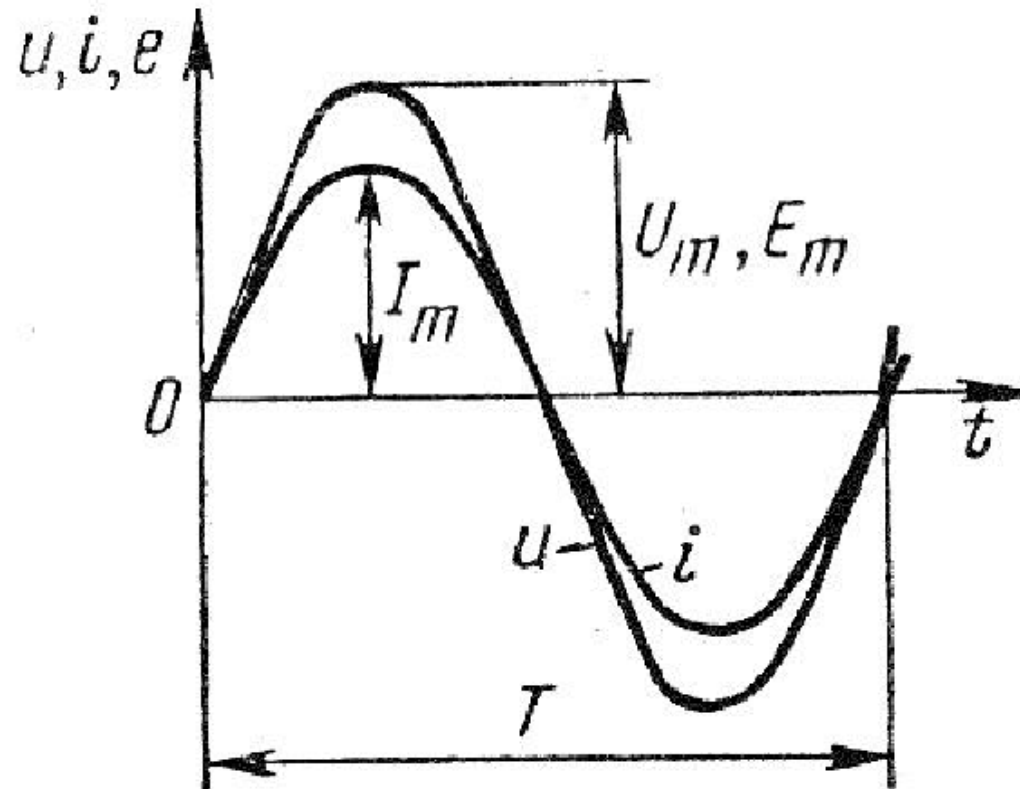
Величину  $\omega t = \frac{2\pi}{T}t = 2\pi ft$ , що стоїть під знаком синуса або косинуса, називають *фазою* коливань, описуваних цими функціями. Фаза визначає значення ЕРС у будь-який момент часу  $t$  й вимірюється в градусах або радіанах. Величина  $f$  називається *частотою* коливань і пов'язана із круговою частотою співвідношенням  $\omega = 2\pi f$ .

Час  $T$  однієї повної зміни ЕРС (час одного оберту рамки) називають *періодом* ЕРС.

Частота коливань пов'язана з періодом співвідношенням  $f = \frac{1}{T}$ . Якщо період вимірюється в секундах, то частота - у герцах (Гц). У більшості країн, включаючи Україну, промислова частота змінного струму становить 50 Гц (у США і Японії - 60 Гц).



Зміна напруги, струму та ЕРС з часом може бути зображена на діаграмі



Мал. 3. Параметри змінного струму

Величина промислової частоти змінного струму обумовлена техніко-економічними міркуваннями. Якщо вона занадто низка, то збільшуються габарити електричних машин і, отже, витрата матеріалів на їхнє виготовлення; помітним стає миготіння світла в електричних лампочках. При занадто високих частотах збільшуються втрати енергії, пов'язані з перемагнічуванням сердечників електричних машин і трансформаторів. Тому найбільш оптимальними виявилися частоти 50-60 Гц. Однак у деяких випадках використовуються змінні струми як з більш високої, так і з більш низькою частотою. Наприклад, у літаках застосовується частота 400 Гц. На цій частоті можна значно зменшити габарити й вагу трансформаторів і електромоторів, що для авіації більш суттєво, ніж збільшення втрат у сердечниках. На залізницях використовують змінний струм із частотою 25 Гц і навіть 16,66 Гц.

# Електричне коло струму

В загальному випадку електричне коло змінного струму може мати резистивні ( $R$ ), індуктивні ( $L$ ) та ємнісні елементи ( $C$ ).

## 2.1.1 Коло змінного струму з резистивним елементом

*Резистивний (активний) опір  $R$*  – це елемент, в якому відбувається необоротний процес перетворення електричної енергії в теплову |.

При підключенні активного опору  $R$  до джерела (рис. 3.1, а) з напругою  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ , де  $U_m$  – амплітуда напруги,  $\omega$  [рад/с] – кругова частота ( $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ , де  $f$  [Гц] – циклова частота,  $T$  [с] – період),  $\psi_u$  – початкова фаза напруги, то у відповідності до закону Ома в колі протікатиме струм

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (3.1)$$

амплітуда якого

$$I_m = \frac{U_m}{R}, \quad (3.2)$$

а початкова фаза  $\psi_i = \psi_u$ , тобто кут зсуву фаз  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ , звідки слідує, що коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 1$ .

*Таким чином, в колі змінного струму з активним опором струм змінюється за тим же законом, що й напруга (рис. 3.1, б) і вони співпадають за фазою.*

Векторна діаграма напруги і струму резистивного елемента приведена на рис. 3.1, в.

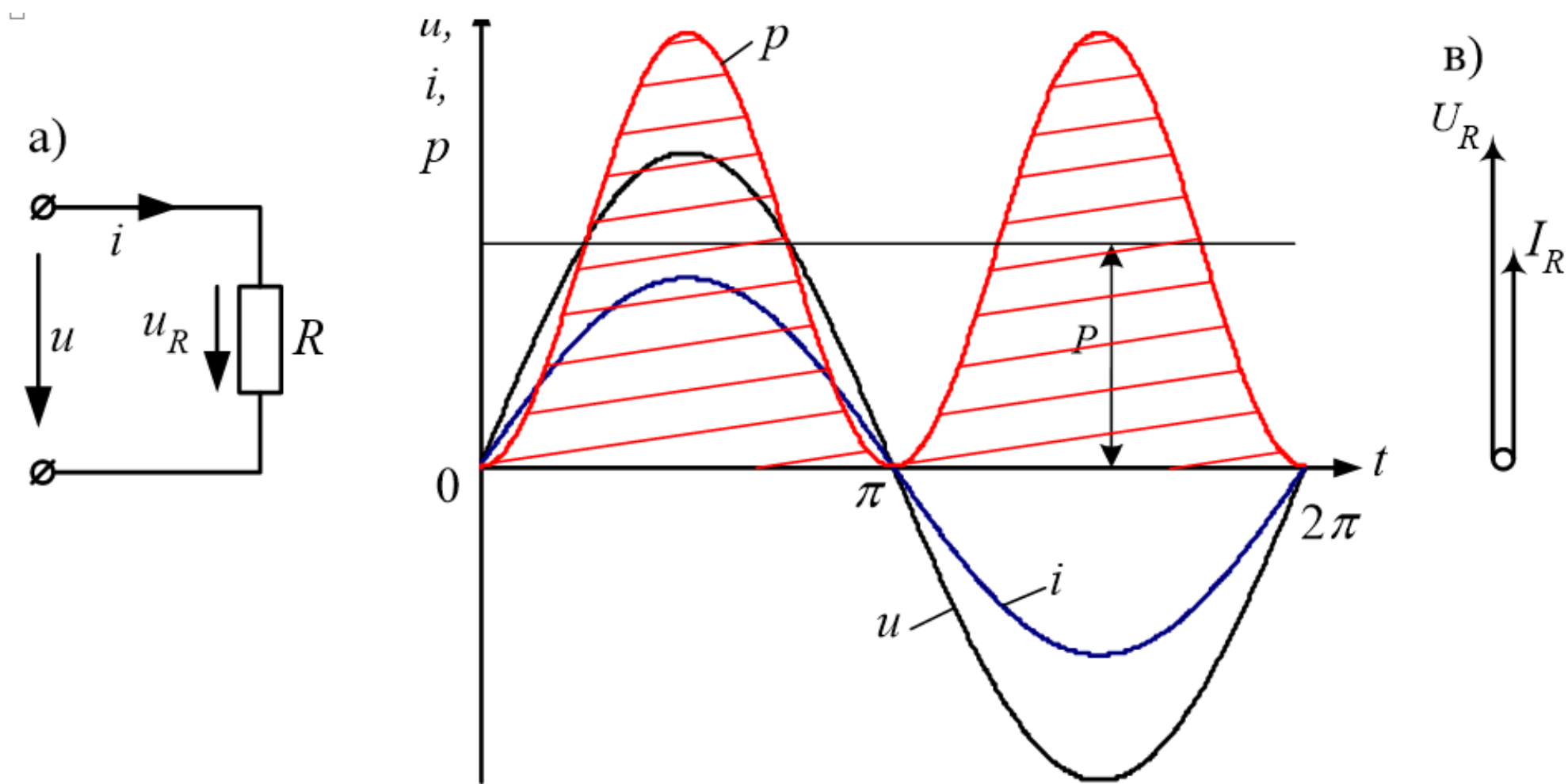


Рисунок 3.1 – До розгляду кола змінного струму з резистивним елементом:  
 а – схема; б – графіки синусоїдальних напруги і струму; в – векторна діаграма

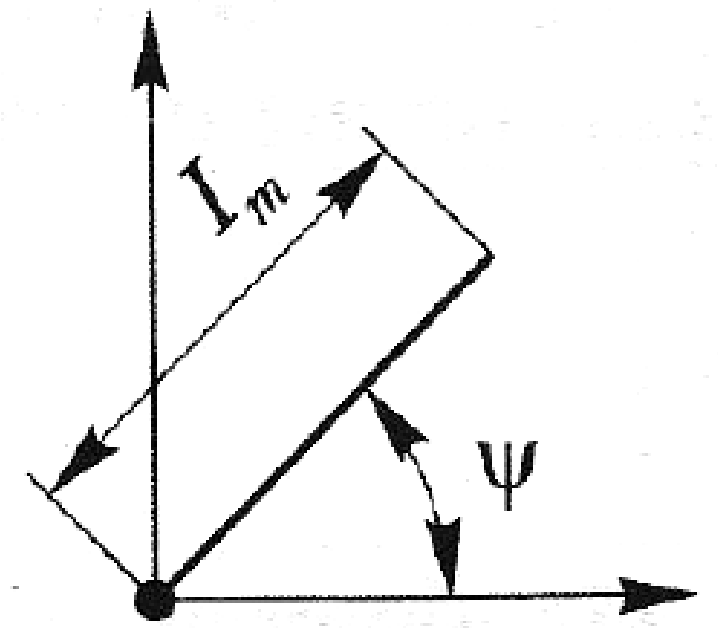
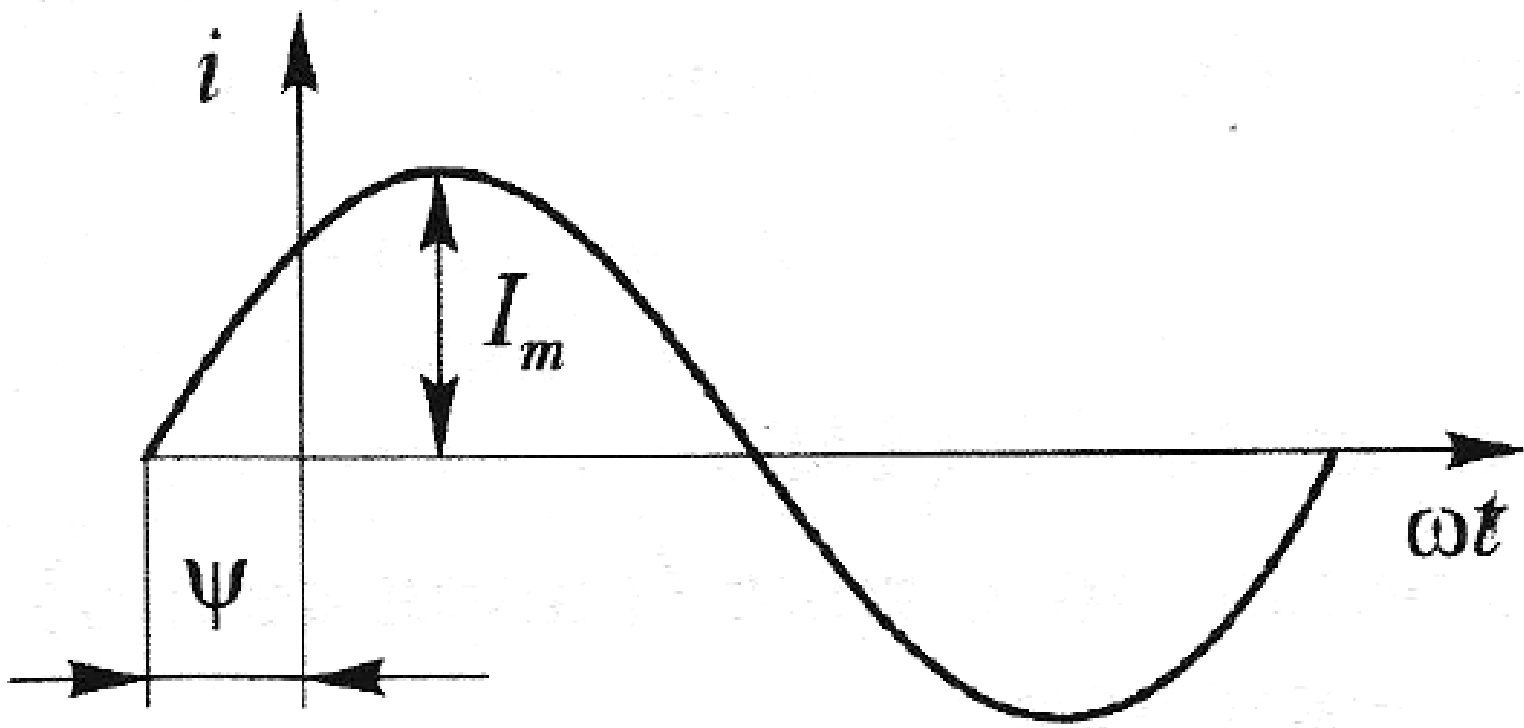
Метод *векторних діаграм*, тобто зображення величин, що характеризують змінний струм векторами, а не тригонометричними функціями, надзвичайно зручний. Тому коротко викладемо його основи.

При описі електричного ланцюга змінного струму за допомогою векторних діаграм кожному струму й напрузі зіставляється вектор на площині в полярних координатах, *довжина* якого дорівнює *амплітуді* струму або напруги, а полярний *кут* - відповідний до *фази*.

Нехай заданий синусоїдальний струм

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

Графік цього струму має вигляд синусоїди, зображеної на мал. 4. Поруч зображений вектор, що відповідає побудованій синусоїді. Цей вектор із модулем, що дорівнює амплітуді, нахилений до горизонтальної осі під кутом  $\psi$



Мал. 4. Графік синусоїдального струму і його векторна діаграма

Як видно з рис. 3.1, б, миттєва потужність  $p(t)$  коливається з подвійною частотою навколо середнього значення  $P$  від нуля до амплітудного значення, тобто завжди залишається додатною.

Середнє значення потужності за період визначається як

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_0^T ui \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T [UI(1 - \cos 2\omega t)] \cdot dt = UI \quad (3.3)$$

або ж як

$$P = RI^2.$$



# Коло змінного струму з індуктивністю

*Індуктивність*  $L$  [Гн] – характеризує властивість елемента кола, наприклад індуктивної котушки, під дією струму в ньому створювати власне магнітне поле.

*Індуктивний опір (реактивний опір індуктивності)* прямо пропорційний частоті змінного струму і індуктивності кола:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \text{ [Ом]}. \quad (3.4)$$

Напруга на індуктивному опорі визначається як

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L\omega I_m \cos(\omega t + \psi_i) \quad (3.5)$$

Або ж як

$$u_L = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (3.6)$$

звідки слідує, що в колі з *індуктивною котушкою* (рис. 3.2, а) *струм відстає від напруги на  $90^\circ$* , тобто  $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$  (рис. 3.2, б, в), а коефіцієнт потужності –  $\cos\varphi = 0$ .

Закон Ома для діючих значень напруги і струму в колі з котушкою записується як

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (3.7)$$

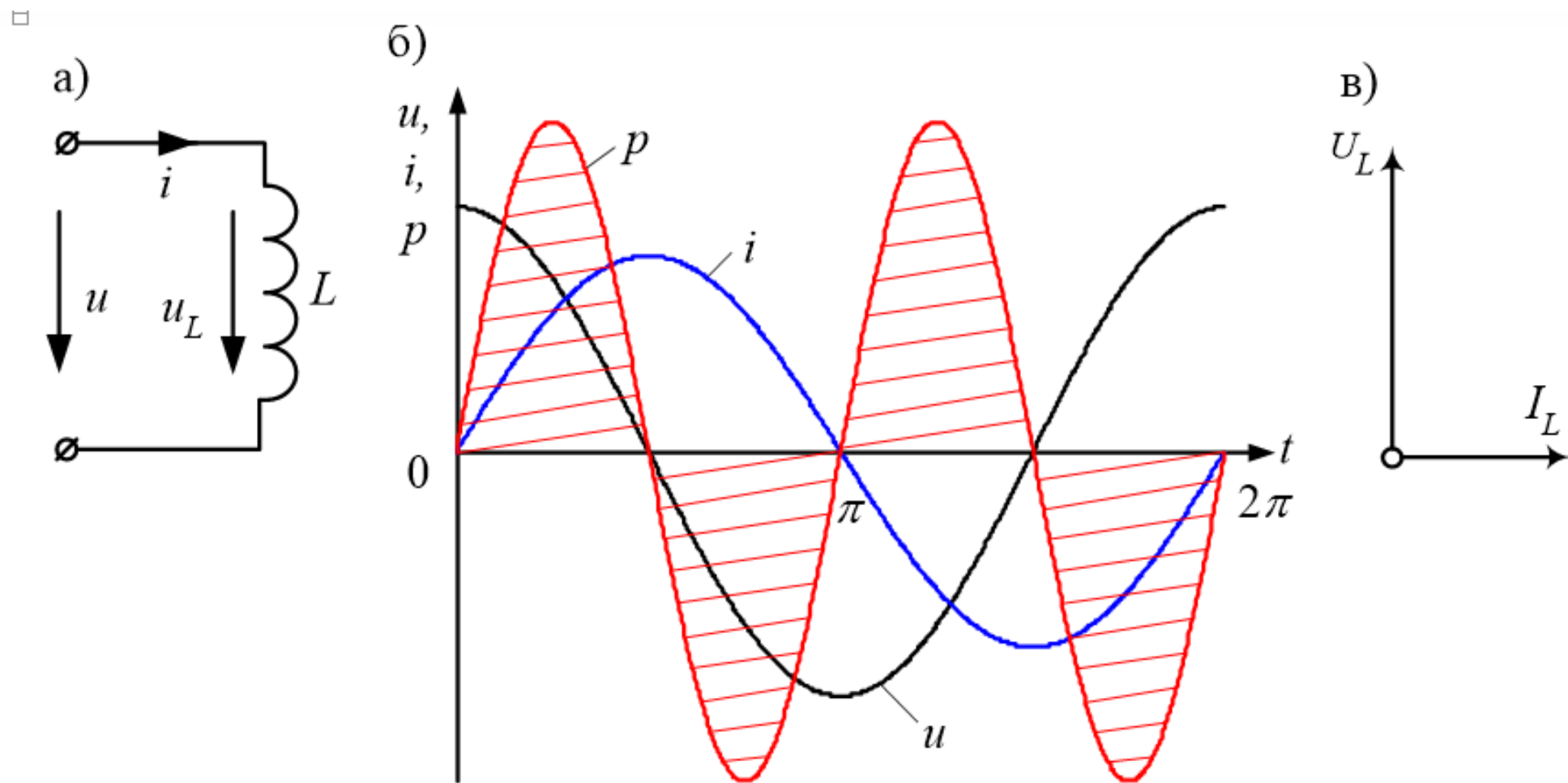


Рисунок 3.2 – До розгляду кола змінного струму з ідеальною індуктивною котушкою: а – схема; б – графіки синусоїдальних напруги і струму; в – векторна діаграма

Діюча змінна напруга зв'язана з амплітудою співвідношенням

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.8)$$

Із часової діаграми (рис. 3.2, б) видно, що потужність  $p(t)$  в колі з індуктивністю змінюється від нуля до амплітудного значення двічі за період, змінюючи свій знак:

Миттєва потужність в колі з індуктивністю визначається за формулою

$$p(t) = u \cdot i = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot I_m \sin \omega t = UI \sin 2\omega t. \quad (3.9).$$

Середнє значення потужності за період визначається як

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_0^T ui \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t \cdot dt = 0, \quad (3.10)$$

тобто індуктивність активної потужності не споживає, що свідчить про наявність періодичного процесу обміну енергією між джерелом електричної енергії й магнітним полем індуктивності. Цю енергію називають *реактивною енергією*, а відповідну їй потужність – *реактивною потужністю*:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X_L \text{ [ВАр]}. \quad (3.11)$$

# Коло змінного струму з конденсатором

Ємність  $C$  [Ф] – характеризує властивість елемента кола, наприклад конденсатора, накопичувати електричні заряди і створювати електричне поле.

В електричних установках ємності утворюються між проводами, проводами і землею в лініях електропередач, а також між іншими елементами струмоведучих конструкцій. В силових електроустановках використовуються конденсатори для підвищення коефіцієнту потужності. В радіотехніці конденсатори застосовуються в коливальних контурах, фільтрах тощо.

Ємнісний опір (реактивний опір конденсатора) обернено пропорційний частоті синусоїдального струму і ємності конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \text{ [Ом]}. \quad (3.12)$$

Якщо конденсатор увімкнути в коло змінного струму (рис. 3.3, а) із синусоїдальною напругою, то він буде заражатися в такт зміні прикладеної напруги.

Закон Ома для діючих значень напруги і струму в колі з конденсатором записується як

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (3.13)$$

Діюче значення струму в колі визначається як

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.14)$$

В колі з конденсатором струм випереджає напругу на  $90^\circ$ , тобто  $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$  (рис. 3.3, б, в), а коефіцієнт потужності –  $\cos\varphi = 0$ .

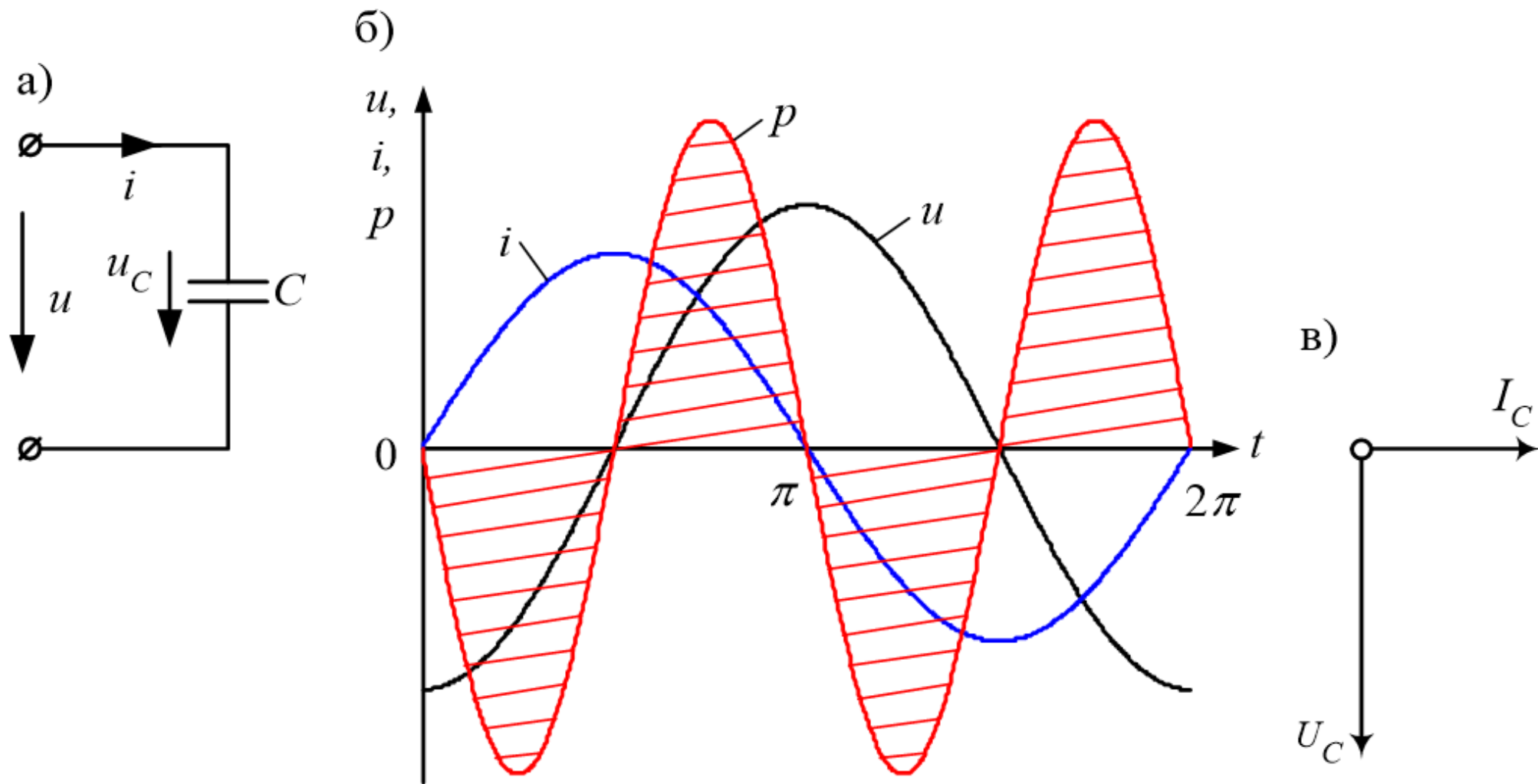


Рисунок 3.3 – До розгляду кола змінного струму з конденсатором:  
 а – схема; б – графіки синусоїдальних напруги і струму;  
 в – векторна діаграма



Із часової діаграми (рис. 3.3, б) видно, що потужність  $p(t)$  в колі з конденсатором змінюється від нуля до амплітудного значення двічі за період, змінюючи свій знак.

Миттєве та середнє значення потужностей в колі з конденсатором визначається відповідно співвідношеннями (3.9) та (3.10), тобто, як і в колі з індуктивністю, відбувається неперервний обмін енергією між мережею та конденсатором. Потужність, що характеризує швидкість змін цієї енергії, називається *реактивною потужністю*:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X_C \text{ [ВАр]}. \quad (3.15)$$

Одиниця вимірювання — вольт-ампер реактивний (вар, вар)

# ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

- 1. Провідники
- 2. Діелектрики (електроізоляційні матеріали)
- 3. Напівпровідники
- 4. Магнітні матеріали

# Класифікація електромагнітних матеріалів



- **Провідники** – це матеріали, що проводять електричний струм. Характеризуються порівняно низьким електричним опором (питомий електричний опір провідників лежить в межах  $\rho=1,6 \cdot 10^{-8} \dots 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). Провідниками є всі метали і металеві сплави, а також деякі інші матеріали.
- **Діелектрики** (електроізоляційні матеріали) – це матеріали, які в звичайних умовах не проводять електричний струм (питомий об'ємний електричний опір діелектриків лежить в межах  $\rho_v=10^6 \dots 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ).
- **Напівпровідники** – матеріали, які за певних зовнішніх енергетичних впливів стають провідниками.
- **Магнітні матеріали** – це матеріали, що є носіями магнітного поля, або здатні підсилювати зовнішнє електромагнітне поле. Виготовляються як з провідникових, так і з напівпровідникових матеріалів

# ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

- Електроізоляційні матеріали розділяють:
- 1). за агрегатним станом – на газоподібні, рідкі і тверді (особлива група – матеріали, що твердіють: у початковому стані вони є рідинами, але в готовій ізоляції стають твердими тілами (наприклад, лаки і компаунди));
- 2). за хімічною природою – на органічні і неорганічні.

# ГАЗОПОДІБНІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

- **Повітря** – основний газоподібний електроізоляційний матеріал. В окремих частинах електричних установок, на ділянках повітряних високовольтних ліній електропередач повітря утворює єдину ізоляцію між дротами лінії. У ряді випадків замість повітря (наприклад, для заповнення газових конденсаторів) застосовується азот, оскільки, він близький за електричними властивостями до повітря, але не містить кисню, захищаючи матеріали від окислення.

- **Елегаз (шестифториста сірка, SF<sub>6</sub>)** має високу електричну міцність (пробивна напруга в нормальних умовах  $U_{пр}=20\text{кВ}$ ). Не токсичний, хімічно стійкий, не розкладається при нагріванні до  $800^{\circ}\text{C}$ ; його використовують у конденсаторах, кабелях і т.п. Особливо великі переваги елегаза при підвищених тисках.
- **Фреон** (дихлордифторметан,  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) має електричну міцність, близьку до електричної міцності елегаза. При нормальній температурі може бути стиснутий лише до 6 атм. Фреон викликає корозію деяких твердих органічних електроізоляційних матеріалів, що треба мати на увазі при конструюванні електричних холодильників.
- Для заповнення електровакуумних приладів, ламп вживаються **інертні гази: аргон, неон і інші, а також пари ртуті і натрію**. Інертні гази мають низьку електричну міцність. Найнижчу електричну міцність серед усіх газів має гелій приблизно в 17 разів менше електричної міцності повітря. Електрична міцність різних газів розрізняється майже в 200 разів.



# НАФТОВІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАСЛА

- **Трансформаторне масло.** З рідких електроізоляційних матеріалів найбільше застосування в електротехніці має трансформаторне масло, яким заливають силові трансформатори. Воно підвищує електричну міцність ізоляції і відвід тепла, що виділяється в обмотках і сердечнику трансформатора. Масло відводить тепло приблизно в 30 разів краще, ніж повітря. Трансформаторне масло – горюча рідина. Пожежна небезпека масла оцінюється за її температурою спалаху (повинна бути не нижче  $135^{\circ}\text{C}$ ). Більш в'язке масло гірше відводить тепло від обмоток і сердечника трансформатора. Температура застигання масла повинна бути не нижче  $-45^{\circ}\text{C}$ .

# Конденсаторне масло

- служить для просочення паперових конденсаторів, розрахованих на велику напругу. При просоченні паперової ізоляції конденсатора підвищується як опір ізоляції, так і її електрична міцність. Конденсаторне масло досить близьке за властивостями до трансформаторного.

# Кабельне масло

- використовуються у виробництві силових електричних кабелів. Просочуючи паперову ізоляцію кабелів, воно підвищує її електричну міцність. Для звичайних силових кабелів із в'язким просоченням, застосовуваних для робочих напруг до 35 кВ, використовуються в'язкі нафтові масла (наприклад, типу "брайтсток"), у яких для додаткового підвищення в'язкості розчиняється каніфоль (масляно-каніфольний компаунд).

# ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНІ ОРГАНІЧНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

- Органічні речовини - це низькомолекулярні і високомолекулярні з'єднання вуглецю (С) з іншими елементами. Вже відкрито більш мільйона органічних сполук, в той час як з'єднань, що не містять вуглецю, відомо біля п'ятдесяти тисяч. Кількість діелектриків з органічних матеріалів набагато перевершує кількість діелектриків з неорганічних матеріалів . Органічні електроізоляційні матеріали бувають низькомолекулярні і високомолекулярні. В молекулу низькомолекулярного матеріалу входить порівняно невелика кількість - одиниці або десятки, іноді сотні – атомів (наприклад, фреон, вуглеводні нафтових масел, совол).

# Високомолекулярні з'єднання

- - це речовини з великими молекулами, що складаються з тисяч атомів. Молекулярна маса таких речовин може доходити приблизно до мільйона, а геометричні розміри молекул настільки великі, що розчини цих речовин, якщо вони взагалі здатні розчинятися, за своїми властивостями наближаються до колоїдних систем. Високомолекулярні речовини, що входять до складу рослинних і тваринних організмів, широко застосовуються в техніці (целюлоза, шовк, каучук і т.п.)

Штучні високомолекулярні матеріали за своїм походженням можуть бути розділені на два класи:

- 1). Штучні матеріали, виготовлені шляхом хімічної обробки природних високомолекулярних речовин (наприклад, при переробці целюлози утворюються ефіри целюлози).
- 2). Синтетичні високомолекулярні матеріали, виготовлені за допомогою синтезу з низькомолекулярних речовин (природний газ, нафта, викопне вугілля й ін.).

- Високомолекулярні з'єднання за своєю хімічною природою є полімерами, тобто речовинами, молекули яких представляють собою циклічну сукупність великої кількості груп, що мають однакову будову груп атомів (мономерів).
- **Полімеризація** - реакція утворення полімеру з мономера.
- **Стирол** - рідкий ненасичений вуглеводень, що має елементарний склад  $C_8H_8$ , має здатність легко полімеризуватися. В результаті полімеризації зі стиролу (мономера) утворюється полімер стиролу (полістирол), який є твердою речовиною. За певних умов (вплив високої температури, механічна обробка й ін.) полімер може розкладатися на речовини з меншим ступенем полімеризації до мономера включно. Такий процес, протилежний процесові полімеризації, називається деполімеризацією.

За здатністю відновлювати структуру полімери поділяють на термопластичні і термореактивні.

- **Термопластичні полімери** не зазнають необоротних змін їхніх властивостей при нагрівання до температури, що відповідає їхньому пластичному стану. Після охолодження термопластичні полімери відновлюють свої властивості. Це лінійні полімери, що зберігають лінійну структуру молекул і при підвищених температурах (полістирол, поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, полікарбонати). При нагріванні стають м'якими (пластичними) і легко деформуються. Можуть розчинятися у відповідних розчинниках.



- **Термореактивні полімери** при нагріванні зазнають необоротних змін властивостей. При підвищених температурах запікаються (отверджуються), тобто здобувають значну механічну міцність і твердість, втрачаючи при цьому властивості розчинності і плавкості. При нагріванні набувають структури, властивої просторовим полімерам (стирол з добавкою дивенілбензола). Використовуються, якщо електрична ізоляція в експлуатації повинна витримувати вплив підвищених температур, не розм'якшуючись, не деформуючись, зберігаючи високу механічну міцність, якщо вона повинна бути стійкою до дії розчинників.

# ПЛАСТИЧНІ МАСИ

- **Пластичні маси** (пластмаси, пластики) – матеріали, що складаються з наповнювача і зв'язуючого. Зв'язуюче – органічне, зазвичай високомолекулярне з'єднання (смола), що має здатність до пластичної деформації під впливом прикладеного ззовні тиску. В окремих випадках застосовуються і неорганічне зв'язуюче (скло, цемент в асбоцементі). Наповнювач може бути порошкоподібним, волокнистим, листовим (кам'яне борошно, деревне борошно, бавовняне, азбестове або скляне волокно, слюда, папір, тканина і т.п.). Наповнювач здешевлює пластмасу і поліпшує її механічні характеристики.

- **Вініпласт** – пластмаса з полівінілхлориду, виготовляється у вигляді листів товщиною до 1 мм. Крім того з вініпласту виготовляють труби, стержні і різні фасонні вироби. Теплостійкість не нижче 65°C. Вініпласт застосовується для створення ізоляції, що працює в умовах високої вологості і впливу хімічно активних речовин, але при відносно невисокій робочій температурі.

- **Шаруваті пластики (гетинакс, текстоліт і ін.)** - композитні матеріали, у яких наповнювачем є той або інший волокнистий матеріал.
- Гетинакс виробляють за допомогою гарячого опресування папера, просоченого бакелітом. Для виробництва гетинаксу береться міцний і нагрівостійкий просочувальний папір.
- Текстоліт – виготовляється з просоченої тканини. Властивості текстоліту
- на бавовняній тканині близькі до властивостей гетинаксу. Має підвищену ударну в'язкість, стійкість до стирання і розколювання. Однак текстоліт у п'ятьшість разів дорожче гетинаксу. Особливим видом текстоліту є склотекстоліт, який виготовляється на основі скляної тканини. Має порівняно високу нагрівостійкість, вологостійкість, механічну міцність і електроізоляційні властивості. Шаруваті пластики застосовують у високо- і низьковольтному апаратоприладобудуванні як основу для виготовлення друкованих плат.

# СКЛО

- Скло - неорганічна аморфна речовина, що є складною системою різних окислів. Крім склостворюючих окислів, тобто таких, кожен з яких здатний сам по собі утворювати скло ( $\text{SiO}_2$  і ін.), до складу скла входять і інші окисли: лужні, лужноземельні й ін. Здебільшого основа скла – кремній ( $\text{Si}$ ). Скло на основі кремнія називають силікатним.
- Важке скло – скло з високим вмістом свинцю (кришталі, флінти). . Міцність скла при стискаючому навантаженні порівняна з міцністю сталей, а міцність при розтягуванні – майже на порядок менше. У звичайних умовах скло крихке. Як і інші аморфні речовини, скло не має різко вираженої температури плавлення. Температура розм'якшення для різних типів скла знаходиться в межах від 400 до 1600°C.

- За призначенням розрізняють шість типів електротехнічного скла:
  1. Конденсаторне – використовуються як діелектрик конденсаторів, застосовуваних у високовольтних фільтрах, в імпульсних генераторах, у коливальних контурах височастотних пристроїв.
  2. Монтажне – служать для виготовлення кріпильних деталей, ізоляторів (телеграфних, антенних, опорних, прохідних і ін.).
  3. Лампове – застосовуються для балонів і ніжок освітлювальних ламп, різних електронних приладів. До них пред'являється вимога з'єднуваності з металом (вольфрамом, молібденом і ін.)
  4. Скломалі – легкоплавкі непрозорі емалі, що призначаються для покриття поверхонь різних виробів.
  5. Скло з наповнювачем – пластмаса гарячого пресування зі скла і слюдяного порошку (мікалексу).
  6. Скловолокно – скло, що витягується в довгі гнучкі нитки, що використовуються для виготовлення текстильних скломатеріалів і світловодів.

# КЕРАМІЧНІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

- Електротехнічна кераміка – неорганічні матеріали, одержувані спіканням глини з мінеральними добавками, а також оксидів металів і інших неорганічних з'єднань (карбідів, боридів, нітридів). У результаті спікання в керамічній масі відбувається утворення міцних зв'язків між складовими суміші, що надає кераміці значної міцності і термостійкості. В електротехніці керамічні матеріали використовують в якості напівпровідникових, магнітних (ферити) і електроізоляційних. Керамічні електроізоляційні матеріали мають високу механічну міцність, малий кут діелектричних втрат, високу діелектричну проникність, значну нагрівостійкість. У порівнянні з органічними електроізоляційними матеріалами кераміка більш стійка до електричного і теплового старіння, не дає залишкових деформацій при тривалій дії механічного навантаження.

- Фарфор є одним з основних матеріалів ізоляторного виробництва. Для виготовлення фарфору застосовують спеціальні сорти глини (каолін) і мінерали кварц і польовий шпат. Основні властивості обпаленого фарфору: щільність 2,3-2,5 г/см<sup>3</sup>; температурний коефіцієнт лінійного розширення менше, ніж у сталі. Фарфор менш крихкий, ніж скло, хімічно стійкий (тому його застосовують для виготовлення хімічного посуду). Електрична міцність при нормальній температурі  $E_{пр}=10-30$  кВ/мм; об'ємний опір  $\rho_v=10^{12}...10^{13}$  Ом·м. При підвищених температурах електроізоляційні властивості порцеляни погіршуються.
- Глазур – склоподібна маса, що наноситься тонким шаром на поверхню фарфорового ізолятора. При випалі глазур розплавляється і покриває поверхню ізолятора тонким шаром. Глазур захищає фарфор від проникнення вологи в пори і тим самим зменшує її гігроскопічність.



## З технічного фарфору виготовляють:

- – лінійні ізолятори – підвісні для більш високих напруг (більше 35кВ) і штирьові для більш низьких; – станційні ізолятори: опорні і прохідні; – апаратні ізолятори, що входять у конструкцію різноманітних апаратів: трансформаторів, масляних вимикачів, роз'єднувачів, розрядників; – монтажні фарфорові вироби: ролики, деталі патронів, вимикачів, штепсельних з'єднань, запобіжників, відтяжні антенні ізолятори, телеграфні і телефонні ізолятори .

# КЛАСИФІКАЦІЯ Й ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

- За здатністю проводити електричний струм металеві провідники умовно розділяють на матеріали високої і низької провідності (або, відповідно, на матеріали з низьким і високим опором).
- Метали з високою провідністю (в основному це срібло, мідь і алюміній) використовуються для виготовлення проводів, кабелів, обмоток трансформаторів, електричних машин і т.д. Метали і сплави високого опору (наприклад, ніхром) застосовуються в електронагрівальних приладах, лампах накаливання, реостатах, зразкових опорах і т.п. До рідких провідників відносяться розплавлені метали і різні електроліти. При нормальній температурі тільки ртуть є рідким металевим провідником. За фізичним механізмом струму провідники розділяють на провідники першого і другого роду.

- Провідниками першого роду або провідниками з електронною провідністю називають матеріали, в яких механізм протікання струму зумовлений наявністю вільних електронів. При цьому механізм переносу енергії (внаслідок руху електронів або передачі імпульсу від електрона до електрона) є питанням відкритим. Провідниками другого роду, або електролітами, є розчини (в основному водні) кислот, лугів і солей, виникнення струму в яких пов'язано з рухом іонів.

# НАДПРОВІДНІСТЬ.

- Якщо екстраполювати залежність питомого опору від температури в область низьких температур, то при температурі, близькій до абсолютного нуля, тобто при  $-273,16^{\circ}\text{C}$  (або  $0\text{ K}$ ), він має бути малим, але насправді при наднизьких температурах питомий опір багатьох металів практично зникає. Електричний опір ряду металів і сплавів починає різко падати при температурах вище абсолютного нуля, в результаті чого вони переходять у надпровідний стан.

- Температура, при якій матеріал переходить в надпровідний стан називається температурою надпровідного переходу. Матеріал, що переходить в надпровідний стан стає надпровідником.

# МЕТАЛИ З НИЗЬКИМ ОПОРОМ

- До найбільш розповсюджених металів високої провідності відносяться мідь і алюміній. Срібло, незважаючи на найвищу провідність, а також золото не мають широкого вжитку внаслідок відносно високої вартості.

## Срібло

- Срібло – сірувато-білий метал, стійкий до окислення при нормальній температурі, має чудову віддзеркалюючу здатність. Срібло характеризується найменшим значенням питомого опору серед інших металів (див. табл. 9.1), але не переходить в надпровідний стан при наднизьких температурах. Має достатньо високу міцність (межа міцності біля 200 МПа) і високу пластичність (відносне подовження до 50%), тому з срібла можна одержати листки товщиною усього лише 0,25 мкм.

- Срібло застосовують для виготовлення проводу і контактів, розрахованих на малі струми, а також для безпосереднього нанесення на діелектрики в якості електродів, у виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів, акумуляторів. В електротехніці досить поширене сріблення. Найтоншу срібну плівку наносять не тільки заради високої віддзеркалюючої здатності, а і заради підвищення хімічної стійкості (срібло краще багатьох інших металів протистоїть дії лугів) і електропровідності виробів. Перевага срібного покриття ще і в високій і щільності (безпористі). Недоліком срібла є його схильність до міграції всередину діелектрика при безпосередньому контакті, а також більш низька хімічна стійкість срібла в порівнянні з іншими благородними металами.



# Мідь

- питомий опір чистої міді ( $\rho=0,017\text{мкОм}\cdot\text{м}$  ) незначно поступається питомому опору срібла, але надзвичайно чутливий до наявності домішок. При вмісті в міді 0,5% Zn, Cd або Ag питома провідність її знижується на 5%. При тім же вмісті Ni, Sn або Al питома провідність міді падає на 25-40%. Домішки Be, Fe, Si або P знижують питому провідність до 55%.

# Широке застосування міді в електротехніці зумовлене:

- 1) малим питомим опором;
- 2) досить високою механічною міцністю і пластичністю;
- 3) задовільною корозійною стійкістю;
- 4) хорошою механічною оброблюваністю;
- 5) відносною легкістю пайки і зварювання;
- 6) порівняно низькою вартістю одержання.

# Алюміній

- метал срібисто-білого кольору, найважливіший представник так званих легких металів (тобто металів із щільністю менш 5 г/см<sup>3</sup>). Щільність литого алюмінію близько 2,6 г/см<sup>3</sup>, а прокатаного - 2,7 г/см<sup>3</sup>. Таким чином, алюміній приблизно в 3,5 рази легше міді. Температурний коефіцієнт лінійного розширення, питома теплоємність і теплота плавлення алюмінію більше, ніж у міді, а температура плавлення – менша.

- В порівнянні з міддю алюміній має нижчі як механічні, так і електричні властивості. Питомий електричний опір чистого алюмінію ( $\rho=0,028 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ) більше, ніж міді, у 1,65 рази. Алюмінієвий провід такого ж електричного опору, як і мідний, повинен мати діаметр в 1,3 рази більше діаметра мідного проводу. При цьому алюмінієвий провід буде в два рази легший мідного проводу при однаковій довжині і електричному опорі.

# Золото

- метал жовтого кольору, має посередню міцність (межа міцності 150 МПа), але високу пластичність (відносне видовження до 40%), досить м'який, має високу корозійну стійкість (при нагріванні вище 100°C на поверхні золота утвориться окісна плівка, яка не зникає при охолодженні до 20°C; товщина плівки дорівнює 30Å.). Електрична провідність золота вища, ніж у алюмінію, але гірша, ніж у міді В електротехніці золото використовується як контактний матеріал для забезпечення корозійної стійкості покриття і стабільності перехідного електричного опору в механічних контактах точних електричних вимірювальних приладів, комп'ютерів, тощо. З золота виготовляють електроди фотоелементів і ін

# МЕТАЛИ ПОСЕРЕДНЬОЇ ПРОВІДНОСТІ

- Залізо і сталі (сплав заліза з вуглецем) - дешевий і широко розповсюджений метал, має високу механічну міцність, але низьку корозійну стійкість. Питомий опір ( $\rho=0,098 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ) майже в 6 разів вищий, ніж у міді. Оскільки сталь є феромагнітним матеріалом, опір сталевих провідників перемінному струму є вищим, ніж постійному. Сталь як провідниковий матеріал використовується для виготовлення коліс трамваїв, електропоїздів залізниць і метро, рейок, сердечників сталевеоалюмінієвих повітряних проводів.

# Платина

- – метал, що практично не реагує з киснем і є досить стійким до хімічних реагентів. Платина добре механічно обробляється, витягується в дуже тонкі нитки і стрічки (відносне видовження 30-35%). Механічна міцність така ж, як у золота.
- Платину застосовують для виготовлення термопар на робочі температури до  $1600^{\circ}\text{C}$  (у парі з платинородієм, див. лекцію 12). Особливо тонкі нитки з платини діаметром  $0,001\text{ мм}$  використовують для виготовлення підвісок рухливих систем в стрілочних і інших чутливих приладах.

# Паладій

- - за багатьма властивостям близький до платини й у ряді випадків служить її замінником. Межа міцності 200МПа, відносне видовження до 40%. Має високу корозійну стійкість: на паладій при нормальній температурі не діє навіть фтор. Паладій використовують у електровакуумній техніці для поглинання водню. При кімнатній температурі один одиниця об'єму паладія вбирає в себе до 950 одиниць об'єму водню.



# МЕТАЛИ І СПЛАВИ З ВИСОКИМ ОПОРОМ

**Титан** – має високу механічну міцність, співставну з міцністю кращих сталей, і надзвичайно високу в'язкість руйнування. При цьому щільність титану майже вдвічі нижча, ніж щільність заліза. Корозійно стійкий. Тому використовується для виготовлення відповідальних елементів конструкцій.

Серед чистих металів титан має найбільший електроопір, поступаючись лише ртуті. Питомий опір титану у 28 раз більший, ніж у міді. Домішки титану сильно знижують провідність алюмінію. Титан є немагнітним металом.

**Ртуть** – метал, що знаходиться в рідкому стані при нормальній температурі і перетворюється у тверде тіло при охолодженні до  $-38,9^{\circ}\text{C}$ . Її добувають із сірчистого з'єднання червоної кіноварі. Ртуть легко випаровується і має значний тиск пари при кімнатній температурі. Пари ртуті отрутні.

# Сплави високого опору

**Сплави високого опору** застосовуються при виготовленні електровимірювальних приладів, зразкових опорів, реостатів і електронагрівальних приладів. В усіх цих випадках від провідника потрібно можливо більший питомий опір.

Для сплавів високого опору при їхньому використанні в електровимірювальних приладах і зразкових опорах важлива також слабка залежність питомого опору від температури і мала термо-е.р.с. відносно міді. Сплави для електронагрівальних приладів повинні бути довговічними при роботі на повітрі при температурах порядку  $1000^{\circ}\text{C}$ , технологічними при виготовленні з них тонкого проводу і відносно недорогими.

**Константан** – сплав міді і нікелю (Cu – 55%; Ni – 45%). Питомий опір у 28 разів вище, ніж у міді, і практично не залежить від температури (табл. 11.1). Тому константан застосовують для виготовлення реостатів і електронагрівальних елементів. Робоча температура сплаву до 450°C (при нагріванні до більш високих температур окислюється).

Константан у парі з міддю або залізом зумовлює виникнення значної термоелектрорушійну силу. Це є недоліком при використанні **константанових резисторів** у вимірювальних схемах, оскільки за рахунок різниці температур у місцях контакту константанових провідників з мідними виникають небажані термоелектрорушійні сили. Константан застосовують також для виготовлення термопар, призначених для вимірювання невисоких температур (декілька сот градусів), а також **тензорезисторів** (пристроїв для вимірювання деформацій).

**Сплави на основі заліза-нікеля-хрома** – використовуються переважно для виготовлення електронагрівальних пристроїв. Висока нагрівостійкість таких сплавів зумовлена додаванням нікеля, хрома і алюмінію. Чим більша частка заліза у сплаві, тим менш нагрівостійким є сплав.

**Залізо-хромо-нікелеві сплави (ферроніхром: Ni – 60%; Cr – 18%; Fe – 20,5%; Mn – 1,5%; ніхром: Ni – 75%; Cr – 21%; Fe – 3,5%; Mn – 1,5%).** Питомий опір у 60 разів вище, ніж у міді. У діапазоні температур від 0 до 1000°C питомий опір ніхрому збільшується не більше ніж на 10% (рис. 11.1). Використовуються для виготовлення нагрівальних елементів, електричних печей, плиток, паяльників і т.д. З цих сплавів виготовляють провід діаметром від 0,02 мм і фольгу товщиною 0,1 мм.

**Залізо-хромо-алюмінієві сплави** (фехраль: 12-15%Cr; 3,5-5,5%Al; Fe; хромаль: 23-27%Cr; 4,5-6,5%Al; Fe). Питомий опір у 70 разів вище, ніж у міді. Вони є більш дешевими сплавами, застосовуються для потужних електронагрівальних пристроїв і промислових печей. У порівнянні з хромо-нікелевими сплавами ці сплави більш тверді і крихкі, виготовлення з них проводів і стрічок утруднене.

# Магнітні матеріали

**Магнітні матеріали, що застосовують в електротехніці, поділяють на:**

- 1) магнітом'які матеріали;
- 2) магнітотверді матеріали;
- 3) матеріали спеціалізованого призначення.

**Магнітом'які матеріали** – матеріали, що мають високу магнітну проникність, невелику коерцитивну силу і малі втрати на гістерезис. Використовуються як сердечники трансформаторів, електромагнітів, у вимірювальних приладах і в інших випадках, коли необхідно за найменших втрат енергії досягти найбільшої індукції. Для зменшення втрат на вихрові струми в трансформаторах використовують магнітом'які матеріали з великим електричним опором, зазвичай застосовуючи магнітопроводи, зібрані з окремих ізольованих тонких листів.

**Залізо** – технічно чисте залізо (армко-залізо) звичайно містить невелику кількість домішок вуглецю, сірки, марганцю, кремнію й інших елементів (до 0,1%), які погіршують його магнітні, властивості. Через порівняно низький електричний опір використовується рідко, в основному для магнітопроводів постійного магнітного потоку.

**Низьковуглецева електротехнічна листова сталь** – містить до 0,04% вуглецю і до 0,6% інших домішок. Випускається у вигляді листів товщиною від 0,2 до 4 мм. Відносна магнітна проникність - не менше 3500-4500, коерцитивна сила - до 100 А/м.



**Кремнієва електротехнічна сталь** – найбільш вживаний магнітом'який матеріал. Введенням кремнію досягається підвищення питомого опору сталі, що дає зниження втрат на вихрові струми і гістерезис, збільшення магнітної проникності, зменшення коерцитивної сили. Кремній несприятливо впливає на механічні властивості заліза, збільшуючи його крихкість і утруднюючи прокатку в листи. При вмісті кремнію понад 5% сталь стає дуже крихкою.

# Магнітотверді матеріали

**Магнітотверді матеріали розділяють на:**

- 1) леговані сталі, що гартуються на мартенсит;
- 2) литі магнітотверді сплави;
- 3) магніти з порошків;
- 4) магнітотверді ферити.

**Леговані сталі, що гартуються на мартенсит** – ці сталі є найбільш доступним матеріалом для постійних магнітів. Вони легуються добавками вольфраму, хрому, молібдену, кобальту (ЕХ, ЕХ5К5). Коерцитивна сила досягає 14 кА/м. **Мартенсит** – пересичений твердий розчин вуглецю в залізі, має голчасту структуру й утворюється в результаті гартування легованої сталі.

**Литі магнітотверді сплави** – потрібні сплави Al-Ni-Fe (сплави альні). Мають відносно велику магнітну енергію. При додаванні кобальту або кремнію магнітні властивості сплавів підвищуються. Сплав альні з добавкою кремнію називають **альнісі**, а сплав альні з кобальтом – **альніко**. Сплав альніко з найбільшим вмістом кобальту (24%) одержав назву **магніко**.

**Магніти з порошків** виготовляються методами порошкової металургії. Розрізняють **металокерамічні магніти** і **магніти з зерен порошку**, скріплених зв'язуючою речовиною (металопластичні магніти). Виготовлення перших зводиться до пресування порошку, що складається з подрібнених тонкодисперсних магнітотвердих сплавів, і до подальшого його спікання при високих температурах за аналогією з процесами відпалу кераміки. Деталі при такій технології можна виготовляються досить точно і не вимагають подальшої обробки. Виготовлення других аналогічне пресуванню деталей із пластмас, але в порошок додається наповнювач з зерен подрібненого магнітотвердого сплаву.

Металокерамічні магніти (ММК1... ММК11) звичайно мають пористість 3-5%, а магнітна енергія і залишкова індукція в них на 10-20% нижче, ніж у литих магнітів з відповідного сплаву, зате за механічною міцністю вони переважають литі магніти в 3-6 разів. Коерцитивна сила 24-128 кА/м.

**Магнітотверді ферити** – найбільш відомий барієвий ферит  $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  (**фероксдюр**). На відміну від магнітом'яких феритів, він має не кубічну, а гексагональну кристалічну ґратку з одноосною анізотропією. Промисловість випускає два види барієвих магнітів: марки БИ (барієві ізотропні) і марок БА (барієві анізотропні). Технологія виробництва БИ подібна технології магнітом'яких феритів, у технологічному процесі виробництва БА операція пресування ведеться в магнітному полі певної орієнтації напруженістю 650-800 кА/м.

Магніти з ферита барію мають коерцитивну силу до 240 кА/м, що перевищує коерцитивну силу магнітів системи альні (145 кА/м), однак за залишковою індукцією і магнітною енергією вони поступаються цим сплавам.

# ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НАПІВПРОВІДНИКИ

Матеріали з електронною електропровідністю, питомий опір яких при нормальній температурі лежить між питомими опорами провідників і діелектриків, відносять до напівпровідників. Електропровідність напівпровідників залежить від зовнішніх енергетичних впливів, а також від наявності спеціальних домішок.

Керованість електропровідністю напівпровідників за допомогою температури, світла, електричного поля, механічних зусиль покладена в основу принципу дії багатьох напівпровідникових пристроїв: терморезисторів (термісторів), фоторезисторів, нелінійних резисторів (варисторів), тензорезисторів і т.д.

Найбільш поширені хімічні елементи напівпровідники це: Бор, Кремній, Германій, Фосфор, Сірка, Селен, Телур, Йод

Електричні вимірювання.  
Класифікація і загальна  
характеристика  
електровимірювальних приладів.

# План лекції

- 1. Класифікація вимірювальних приладів.
- 2. Прилади магнітоелектричної системи.
- 3. Прилади електромагнітної системи.
- 4. Прилади електродинамічної систем.
- 5. Вимірювання опорів.
- 6. Цифрові вимірювальні прилади.



- Для контролю режиму електричних кіл доводиться вимірювати ряд фізичних величин: струм, напругу, потужність, енергію. У ланцюгах змінного струму крім цього вимірюють також частоту, зрушення по фазі й контролюють форму кривої напруги й струму. **Вимірювання** - знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. **Технічні засоби**, які служать для виміру електричних величин, називаються **електровимірювальними приладами**.

Електровимірювальні прилади можна класифікувати:

- а) за родом вимірювальної величини;
- б) за фізичним принципом дії вимірювального механізму;
- в) за родом струму;
- г) за класом точності;
- д) за типом відлікового пристрою;
- е) за виконанням залежно від умов експлуатації;
- є) за стійкістю до механічних впливів;
- ж) за ступенем захисту від зовнішніх магнітних та електричних полів тощо.
-

## *За вимірювальною величиною*

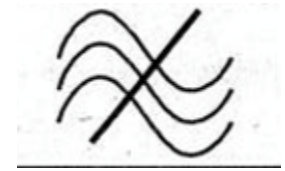
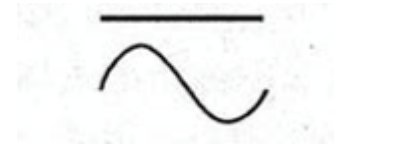
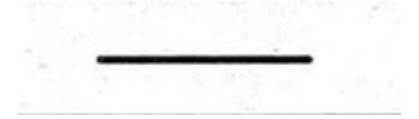
- — вольтметри (позначаються літерою  $V$ );
- — амперметри ( $A$ );
- — ватметри ( $W$ );
- — омметри ( $\Omega$ );
- — лічильники енергії ( $Wh$ );
- — фазометри ( $\varphi$ );
- — частотоміри ( $Hz$ ) тощо.
- До умовної літери може бути додано позначення кратності основної одиниці, наприклад: міліамперметр —  $mA$ ; кіловольтметр —  $kV$ ; мегомметр —  $M\Omega$  тощо.

*За фізичним принципом дії* розрізняють такі системи електровимірювальних приладів:

Тип приладу	Умовні позначки
Магнітоелектричний	
Випрямний з магнітоелектричним механізмом	
Електромагнітний	
Електродинамічний	
Феродинамічний	
Індукційний	
Термоелектричний	

Умовні позначення на шкалі приладу характеризують класифікацію приладів *за родом струму*:

- а) постійний струм;
- б) змінний (однофазна система);
- в) постійний і змінний;
- г) трифазна система;
- д) трифазна несиметрична система.



## *За класом точності*

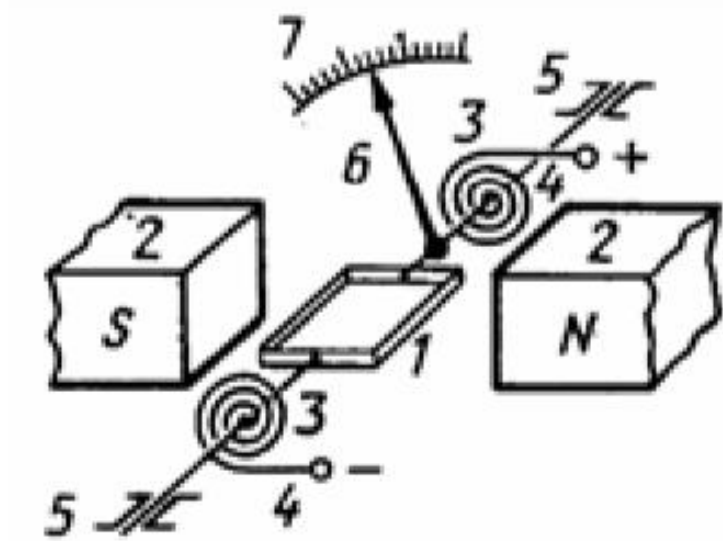
- Клас точності позначається цифрою, котра дорівнює зведеній похибці у відсотках, що допускає прилад. Випускають прилади таких класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. У лічильниках електроенергії класи точності такі: 0,5; 1,0; 2,0; 2,5.

# Види вимірювальних приладів за типом відлікового пристрою

Більш поширені показуючі прилади, тобто прилади безпосередньої оцінки. Відліковий пристрій цих приладів складається з шкали і показника. Показчиком може бути стрілка або світлова пляма з рисою. Такі показуючі прилади називаються **аналоговими**. Показання таких приладів — це безперервна функція величини, що вимірюється.

В **цифрових** електровимірювальних приладах показання наводяться у цифровому вигляді.

# Прилади магнітоелектричної системи



Мал. 1. До принципу дії приладу магнітоелектричної системи



Мал. 2. Кілоамперметр магнітоелектричної системи



# Принцип дії приладу магнітоелектричної системи

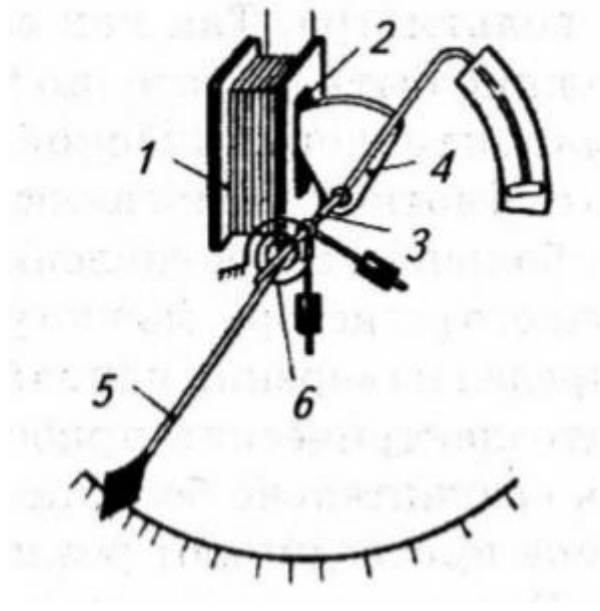
- Полюсні наконечники магніту 2 призначені для створення однорідного магнітного поля, у якому може повертатися навколо своєї осі 5 легка алюмінієва рамка 1, яка містить обмотку. Вимірюваний струм, при підключенні приладу через клеми 4, проходить у рамку через спіральні пружини 3, які одночасно служать для створення протидіючого моменту.

# Позначення на шкалі вимірювального приладу, зображеного на мал. 2

Найменування приладу	Тип (вимірювана фізична величина)	Клас точності приладу	Рід вимірюваного струму	Робоче положення	Напруга випробування ізоляції	Система приладу
M42101	кілоамперметр	1,5	постійний	вертикальне	2 кВ	магнітоелектрична
<b>M42101</b>	<b>кА</b>	<b>1,5</b>	<b>—</b>	<b>⊥</b>	<b>☆2</b>	<b>⌒</b>

- Якщо магнітоелектричний прилад використовують для виміру порівняно великих струмів, то паралельно рамці приєднують резистор, називаний шунтом. У цьому випадку через вимірювальний прилад іде тільки частина вимірюваного струму, і межа виміру по струму розширюється. Магнітоелектричні прилади придатні тільки для вимірювань в ланцюгах постійного струму. При включенні їх у ланцюг змінного струму застосовують перетворювальні пристрої (випрямлячі, термоелектричні перетворювачі і т.д.). Магнітоелектричні прилади мають високу точність і чутливість, рівномірну шкалу, низьку сприйнятливність до змін температури навколишнього середовища й зовнішніх магнітних полів, мале споживання енергії. Недоліки таких приладів - придатність тільки для постійних струмів (для змінних струмів потрібні додаткові пристрої), велика чутливість до перевантажень, складність конструкції й висока вартість.

# Прилади електромагнітної системи



Мал. 3. До принципу дії приладу електромагнітної системи



Мал. 4. Амперметр змінного струму електромагнітної системи

# Робота приладів електромагнітної системи

- Принцип дії приладів електромагнітної системи заснований на взаємодії магнітного поля котушки, створюваного вимірюваним струмом, зі сталевим сердечником, поміщеним у це поле (мал. 3). При протіканні вимірюваного струму через котушку 1 у її плоскій щілині 2 створюється магнітне поле. Поза котушкою на агатових підп'ятниках встановлена вісь 3 з ексцентрично укріпленим осердям 4 з магнітом'якої (з малою коерцитивною силою й великою магнітною проникністю) сталі й стрілкою 5. Магнітне поле котушки намагнічує осердя 4 і втягує його усередину, повертаючи тим самим вісь зі стрілкою приладу. Цьому повороту перешкоджає спіральна пружина 6, що закручується та створює протидіючий момент.

На відміну від приладів магнітоелектричної системи *в приладів електромагнітної системи кут відхилення стрілки  $\alpha$  пропорційний квадрату струму  $I$*   
( $c$  - постійна приладу):

$$\alpha = cI^2, \quad (4)$$

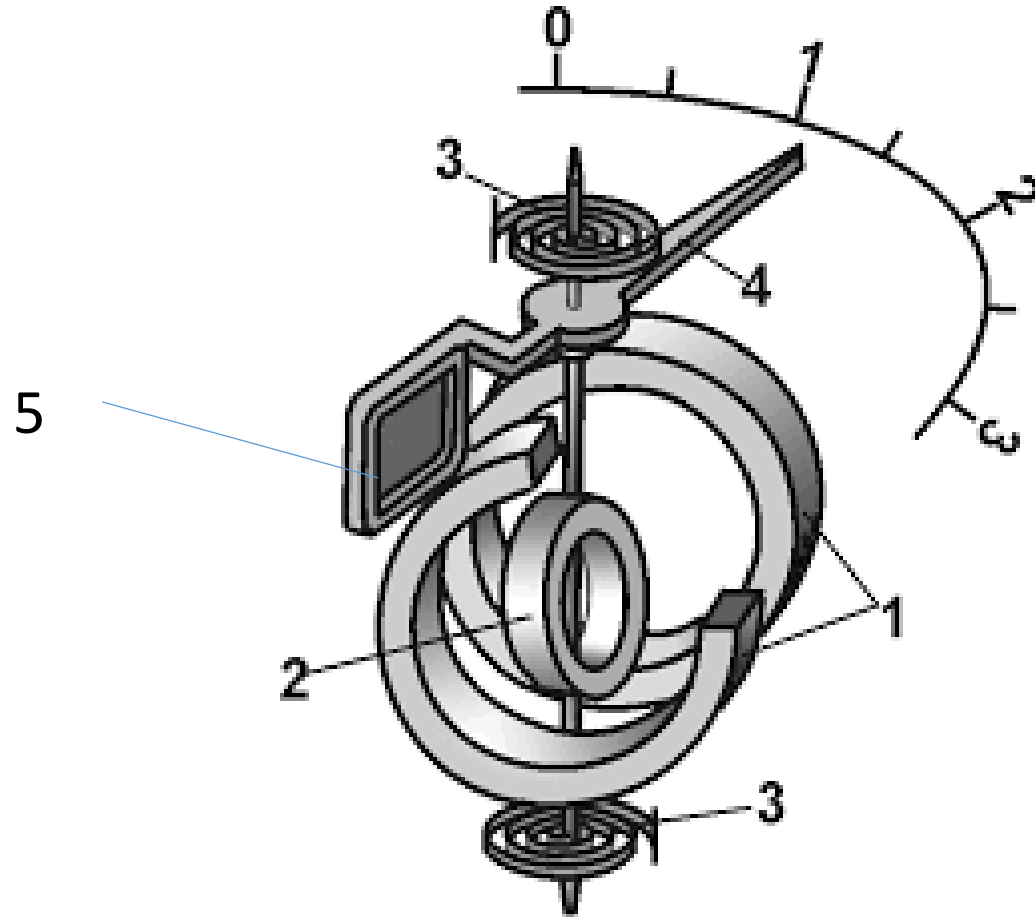
тому *шкала електромагнітного приладу нерівномірна* (мал. 4).

# Застосування

- Ці прилади придатні для вимірів у ланцюгах і постійного, і змінного струму. У ланцюзі змінного струму вони вимірюють діюче значення. Електромагнітні прилади застосовуються і як амперметри, і як вольтметри.
- Перевагами електромагнітних приладів є простота конструкції, невисока вартість, придатність для постійного й змінного струму, здатність витримувати великі перевантаження, можливість безпосереднього включення амперметрів на великі струми, а також придатність для застосування як щитових приладів. Недоліки: нерівномірність шкали, низька чутливість, порівняно велике власне споживання енергії, висока чутливість до впливу зовнішніх магнітних полів.

# Прилади електродинамічної систем

- Принцип дії приладів електродинамічної системи засновано на механічній взаємодії двох котушок зі струмом .





- Нерухлива котушка 1 складається із двох секцій (для створення однорідного поля) і навивається звичайно товстим дротом. Усередині нерухливої міститься легка рухлива котушка 2, жорстко скріплена з віссю й стрілкою 4. Рухлива котушка включається у вимірюваний ланцюг через спіральні пружини 3, що створюють протидіючий момент. Прилад також містить повітряний заспокоювач 5.
- При проходженні струму по котушках створюються два магнітні поля, які прагнуть повернути рухливу котушку в положення, у якому енергія всього механізму була б мінімальною.

Кут відхилення стрілки приладу електродинамічної системи пропорційний добутку струмів у котушках:

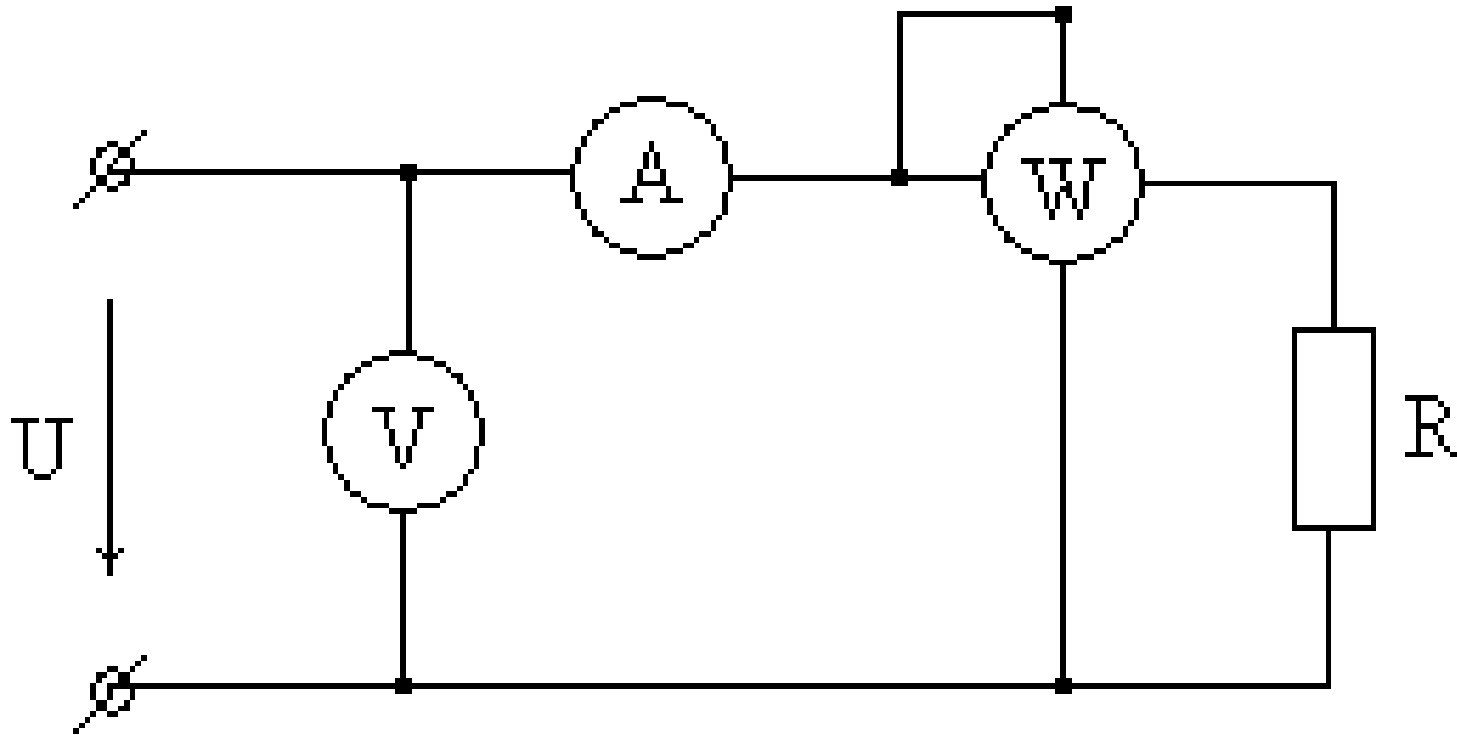
$$\alpha = kI_1I_2, \quad (5)$$

де  $k$  - постійна даного приладу.

Електродинамічні прилади можна використовувати й для *змінного струму*, бо напрямки струмів в обох котушках змінюються на протилежні одночасно, і тому напрямок повороту рухливої котушки залишається незмінним.

- Електродинамічні прилади використовуються як вольтметри, амперметри й головним чином як ватметри.
- Шкали електродинамічних вольтметрів і амперметрів нерівномірні, тому що струми в обох котушках пропорційні одній і тій самій вимірюваній величині.
- До переваг електродинамічних приладів належать точність і придатність для вимірювань в ланцюгах постійного й змінного струму. Недоліками є нерівномірна шкала, велика чутливість до перевантажень (через наявність струмоведучих пружин) і залежність від зовнішніх магнітних полів. У ланцюгах змінного струму за допомогою електродинамічного ватметра можна вимірювати як активну, так і реактивну потужність.

# Схеми підключення вольтметра, амперметра та ватметра



# Вимірювання опорів

- Для безпосереднього вимірювання опорів застосовують омметри - прилади, у яких шкала проградуйована в омах. Звичайно омметр - прилад, що поєднує в одному корпусі міліамперметр магнітоелектричної системи шкала якого проградуйована в Омах, джерело живлення (батарею) і додатковий резистор  $R$ , що обмежує струм (мал. 7).

# Омметры

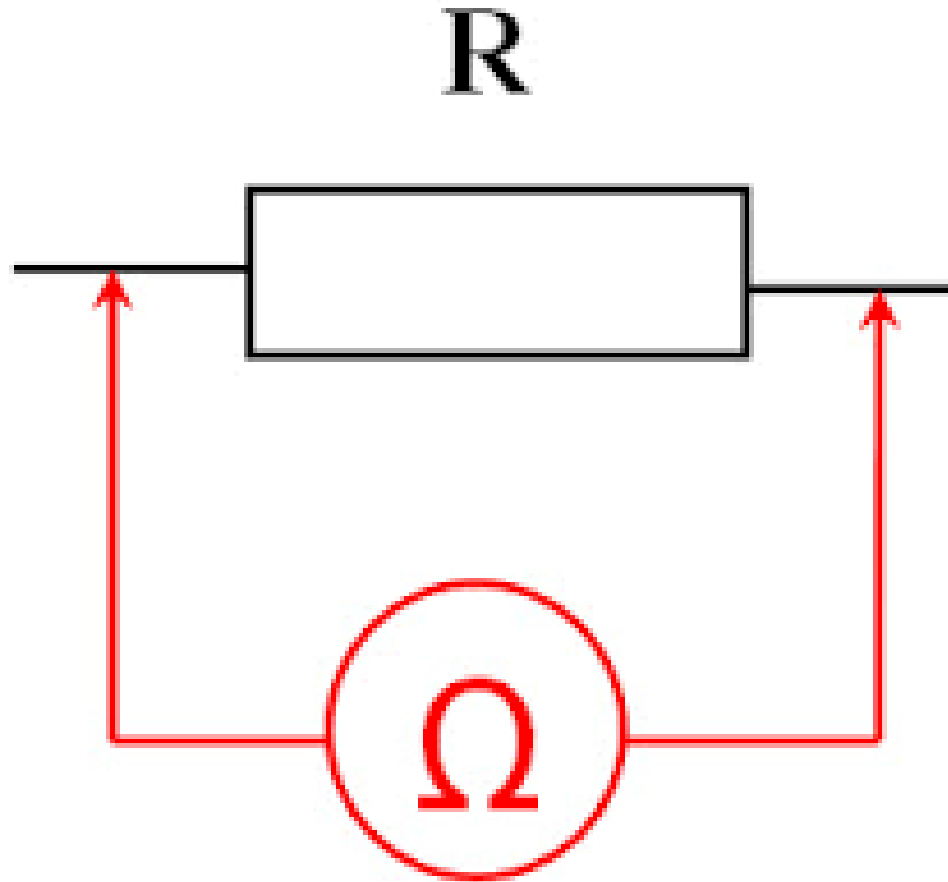


Мал. 8. Омметр



Мал. 9. Мегаомметр

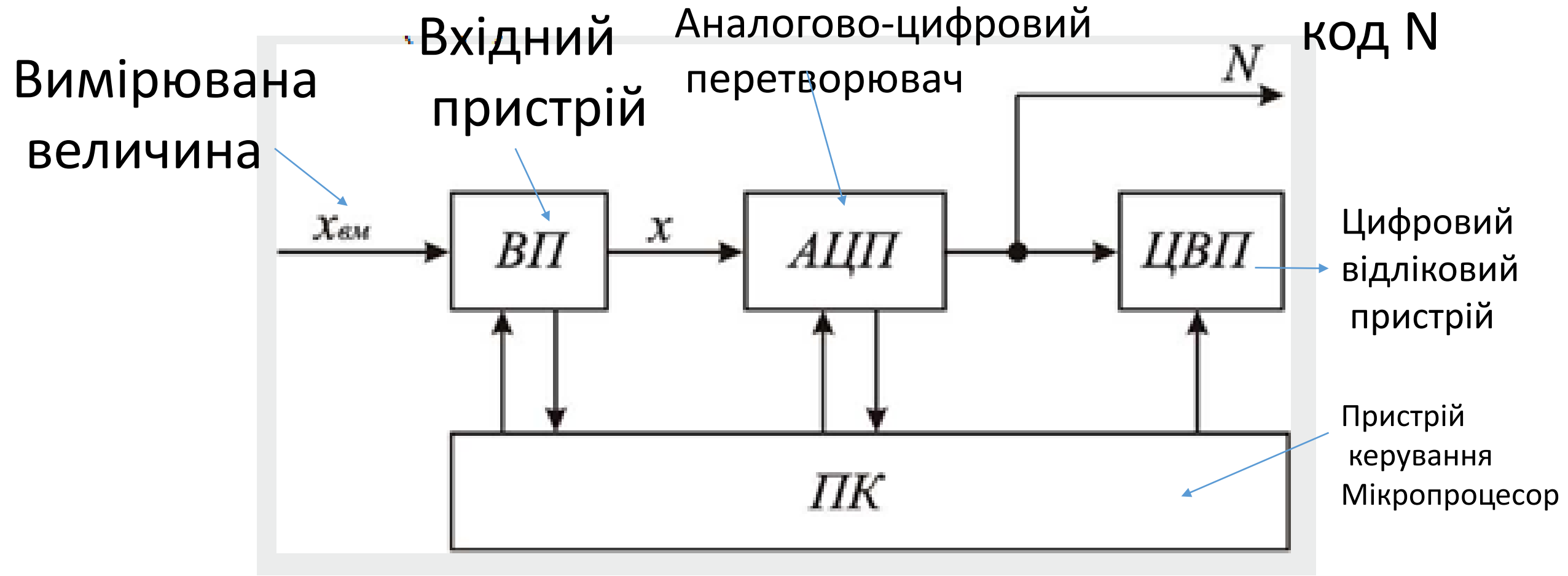
# Схеми підключення омметра



- За законом Ома  $R = U/I$  між струмом і опором існує обернено пропорційна залежність, тому шкала омметра нерівномірна (мал. 8). Вона сильно стиснута в кінці, відповідному до великих опорів. Для вимірювання великих опорів (опору ізоляції електричних машин, апаратів, приладів і електричної мережі напругою до 1000 В) застосовуються мегаомметри (мал. 9). Омметри з електровимірювальним механізмом дозволяють вимірювати опори, що не перевищують декількох тисяч Мом. Для вимірювання великих опорів використовуються електронні омметри (тераомметри).



# ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ



**Рис. 6.1 - Узагальнена функціональна схема ЦВІП**

# Робота цифрового вимірювального пристрою

- Вимірювана величина, яка подається на вхід цифрового вимірювального пристрою (ЦВП), є величиною безперервною. Безперервну величину часто називають аналоговою величиною. Процес перетворення аналогової величини в цифрову називається аналогово-цифровим перетворенням, а перетворювач, що здійснює це перетворення - аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП).

- Вимірювана величина  $X_{вм}$  подається на вхідний пристрій ВП, призначений для масштабного перетворення вхідної величини та відділення її від завад. АЦП перетворює величину  $x$  в код  $N$ , що подається на цифровий відліковий пристрій ЦВП, де відображається у вигляді ряду цифр або виводиться на зовнішній пристрій. Як пристрій керування ПК в сучасних ЦВП використовуються мікроконтролери.

- За видом вимірюваних величин ЦВП діляться на:
- Вольтметри постійного та змінного струму.
- Омметри та мости постійного та змінного струму.
- Комбіновані прилади.
- Вимірювачі частоти й інтервалів часу.
- Спеціалізовані ЦВП, призначені для вимірювань температури, маси вантажів, швидкостей і т.п.

# Прилад цифровий вимірювальний мультиметр

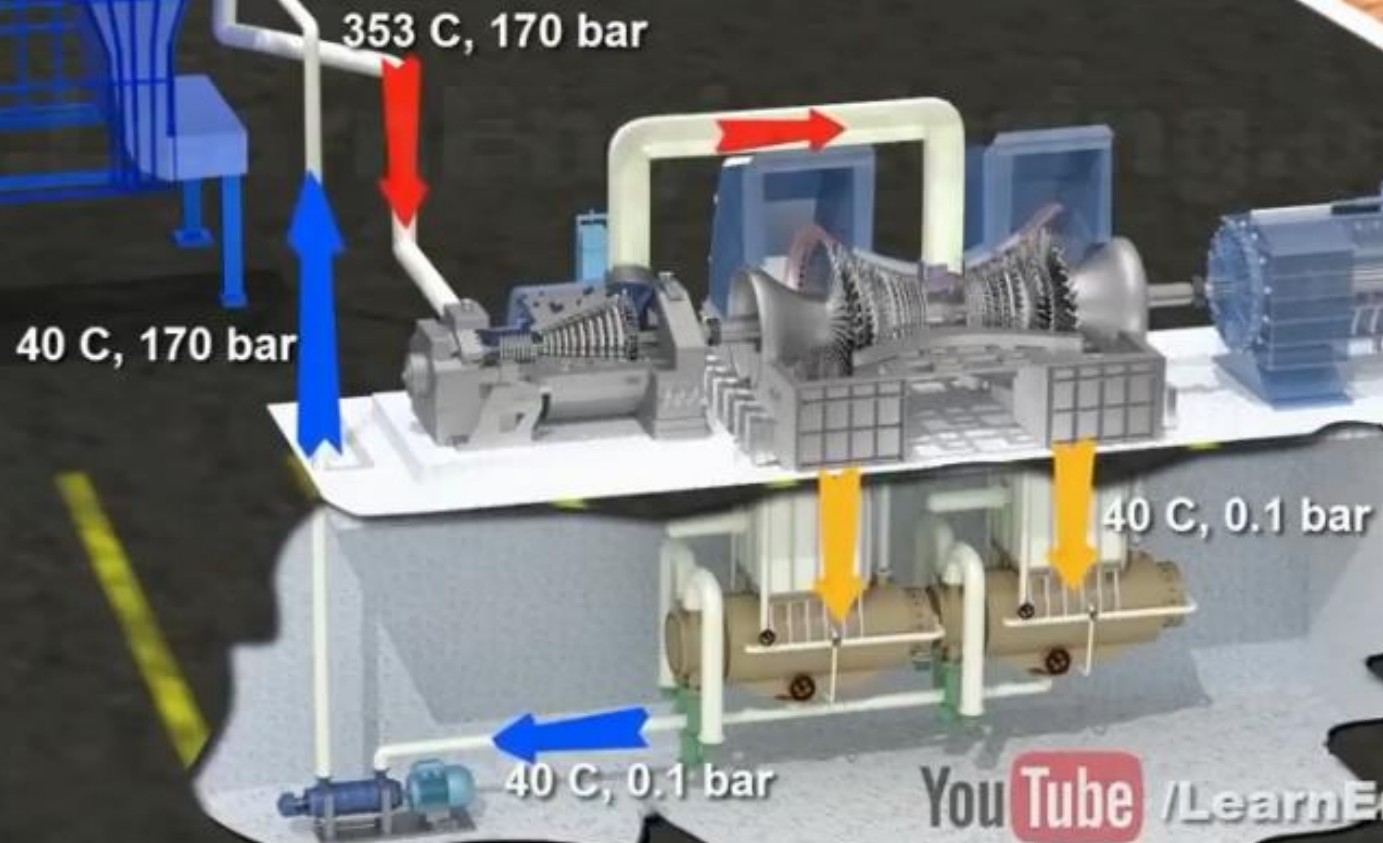


Генерація, транспортування та розподіл електроенергії.  
Електричні станції, мережі і електропостачання. Режими роботи електричної мережі.  
Електроенергетичні системи.

- **Генерація електричної енергії**
- Генерація електроенергії - це процес перетворення різних видів енергії в електричну на індустріальних об'єктах, званих електричними станціями. В даний час існують такі види генерації:
- **Теплова електроенергетика.** В даному випадку в електричну енергію перетворюється теплова енергія згоряння органічних палив. До тепловій електроенергетиці відносяться теплові електростанції ( ТЕС), які бувають двох основних видів:
  - Конденсаційні ( КЕС, також використовується стара аббревіатура ГРЕС);
  - Теплофікаційні (теплоелектроцентралі, ТЕЦ). Теплофікація називається комбіноване виробництво електричної та теплової енергії на одній і тій же станції;
- КЕС і ТЕЦ мають схожі технологічні процеси. В обох випадках є котел, в якому спалюється паливо і за рахунок тепла, що виділяється нагрівається пара під тиском. Далі нагріте пар подається в парову турбіну, де його теплова енергія перетворюється в енергію обертання. Вал турбіни обертає ротор електрогенератора - таким чином енергія обертання перетворюється в електричну енергію, яка подається в мережу. Принциповою відмінністю ТЕЦ від КЕС є те, що частина нагрітого в котлі пара йде на потреби теплопостачання;

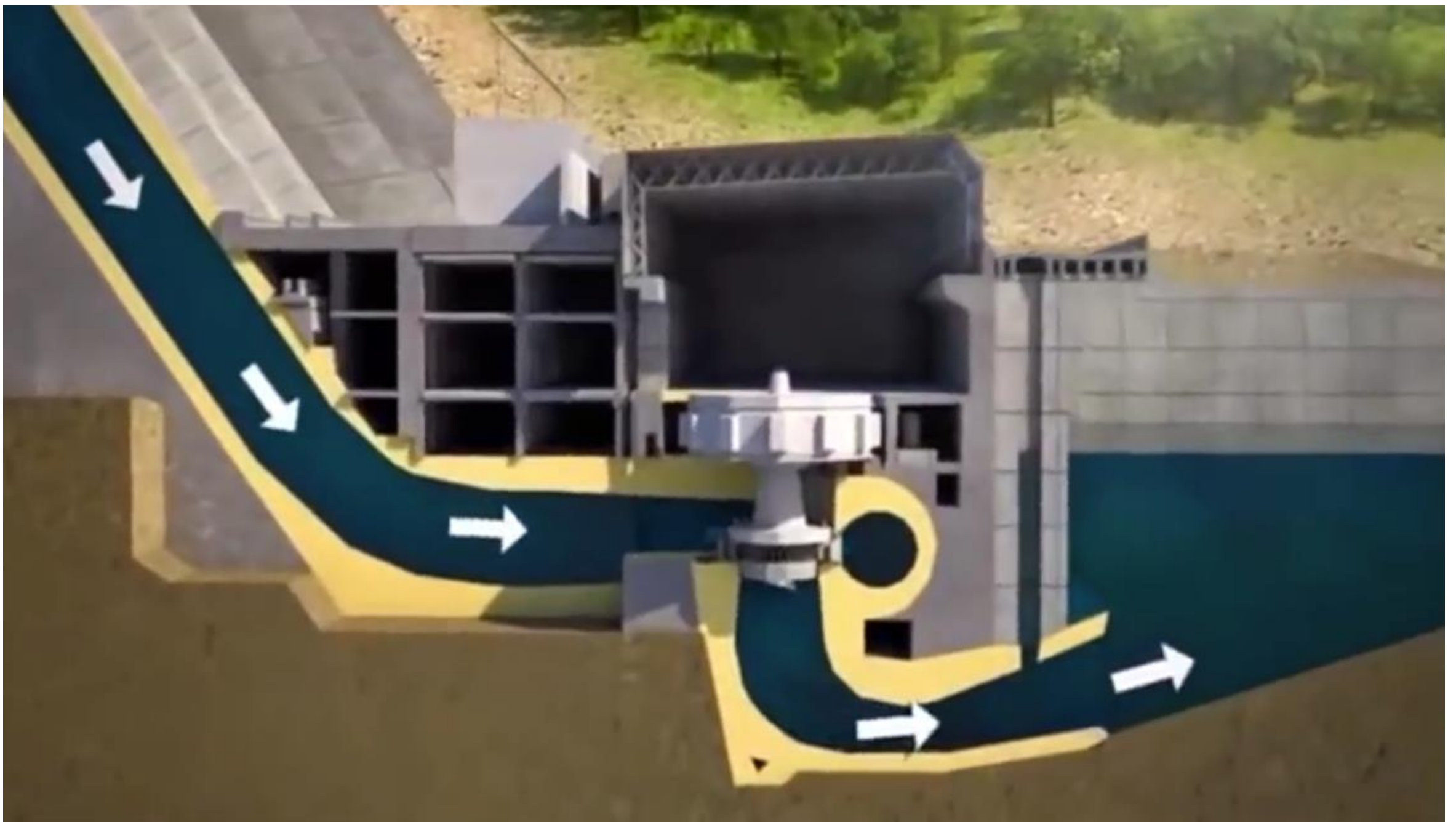
# ЦИКЛ РЭНКИНА

$\eta = 20-25\%$





- **Гідроенергетика.** До неї відносяться гідроелектростанції ( [ГЕС](#)). У гідроенергетиці в електричну енергію перетворюється кінетична енергія течії води. Для цього за допомогою [гребель](#) на річках штучно створюється перепад рівнів водянй поверхні (т. зв. верхній і нижній б'єф). Вода під дією сили тяжіння переливається з верхнього б'єфа в нижній за спеціальними протоках, в яких розташовані водянй турбіни, лопаті яких розкручуються водянй потоком. Турбіна ж обертає ротор електрогенератора. Особливою різновидом ГЕС є гідроакумулюючі станції ( [ГАЕС](#)). Їх не можна вважати генеруючими потужностями в чистому вигляді, так як вони споживають практично стільки ж електроенергії, скільки
- виробляють, однак такі станції дуже ефективно справляються з розвантаженням мережі в пікові години;



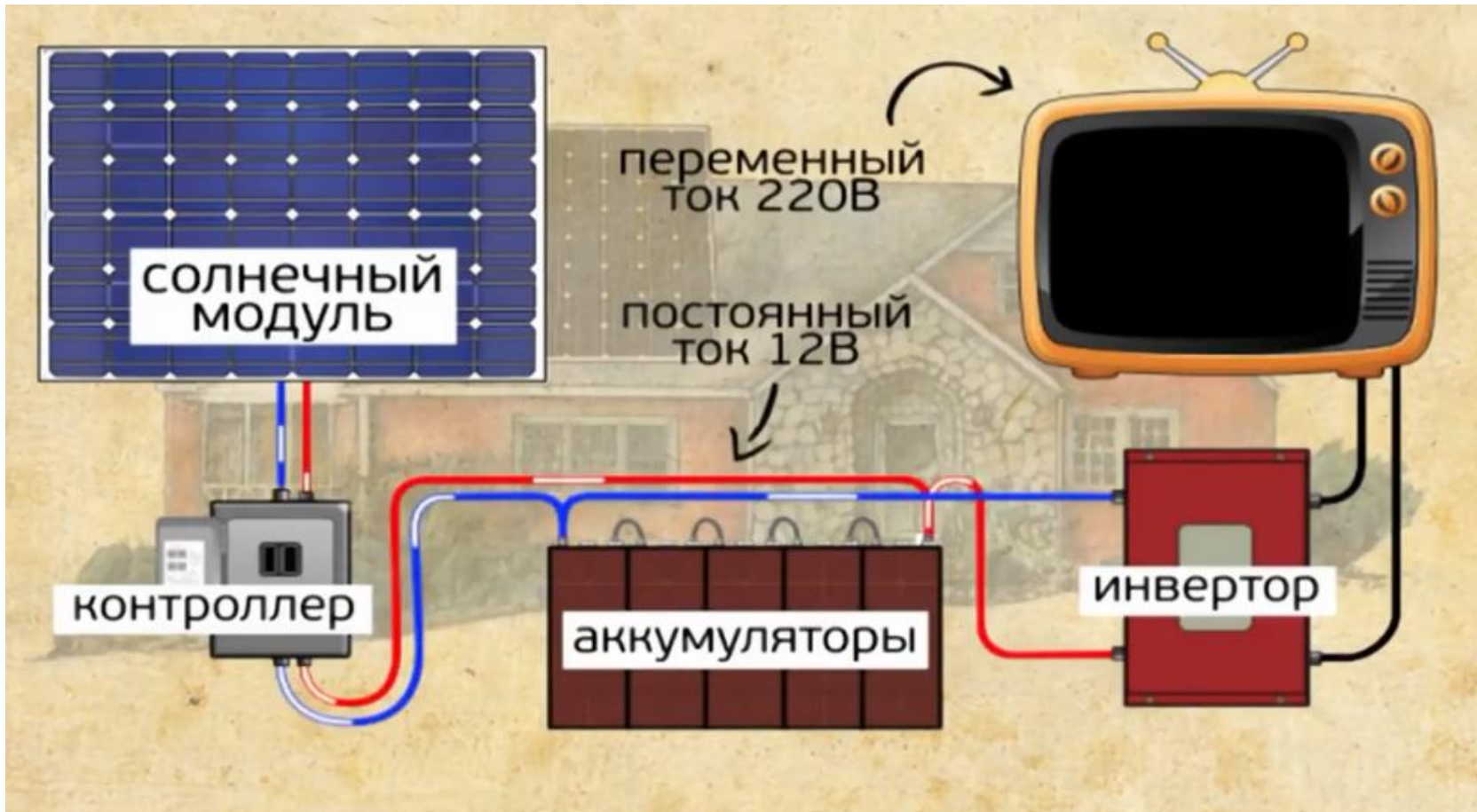
. **Альтернативна енергетика.** До неї відносяться способи генерації електроенергії, мають ряд переваг в порівнянні з "традиційними", але з різних причин не отримали достатнього поширення. Основними видами альтернативної енергетики є:

- **Вітроенергетика** - використання кінетичної енергії [вітру](#) для отримання електроенергії;



# Геліоенергетика - отримання електричної енергії з енергії сонячних променів;

Спільними недоліками вітро-та геліоенергетики є відносна малопотужність генераторів при їх дорожнечі. Також в обох випадках обов'язково потрібні акумулюючі потужності на нічний (для геліоенергетики) і безвітряний (для вітроенергетики) час;



- **Геотермальна енергетика** - використання природного тепла [Землі](#) для вироблення електричної енергії. По суті геотермальні станції є звичайні ТЕС, на яких джерелом тепла для нагрівання пара є не котел або ядерний реактор, а підземні джерела природного тепла. Недоліком таких станцій є географічна обмеженість їх застосування: геотермальні станції рентабельно будувати тільки в регіонах тектонічної активності, тобто, там, де природні джерела тепла найбільш доступні;

# Передача і розподіл електричної енергії

- Передача електричної енергії від електричних станцій до споживачів здійснюється по електричних мережах. Електромережевого господарства - природно-монопольний сектор електроенергетики: споживач може вибирати, у кого купувати електроенергію (тобто енергозбутової компанії), енергозбутова компанія може вибирати серед оптових постачальників (виробників електроенергії), однак мережа, по якій поставляється електроенергія, як правило, одна, і споживач технічно не може вибирати електромережних компаній. З технічної точки зору, електрична мережа являє собою сукупність ліній електропередачі (ЛЕП) і трансформаторів, що знаходяться на підстанціях.

. **Лінії електропередачі** являють собою металевий провідник, по якому проходить електричний струм. В даний час практично повсюдно використовується змінний струм. Електропостачання в переважній більшості випадків - трифазне, тому лінія електропередачі, як правило, складається з трьох фаз, кожна з яких може включати в себе кілька проводів. Конструктивно лінії електропередачі діляться на **повітряні** та **кабельні**.



- **Повітряні лінії (ПЛ)** підвішені над поверхнею землі на безпечній висоті на спеціальних спорудах, званих опорами. Як правило, провід на повітряній лінії не має поверхневої ізоляції; ізоляція мається на місцях кріплення до опор. На повітряних лініях є системи [грозозахисту](#). Основною перевагою повітряних ліній електропередачі є їх відносна дешевизна в порівнянні з кабельними. Також набагато краще ремонтпридатність (особливо в порівнянні з безколекторними кабельними лініями): не потрібно проводити земляні роботи для заміни дроти, нічим не ускладнений візуальний контроль стану лінії. Однак, у повітряних ЛЕП є ряд недоліків:
  - широка смуга відчуження: в околиці ЛЕП заборонено ставити будь-які споруди і садити дерева, при проходженні лінії через ліс, дерева по всій ширині смуги відчуження вирубуються;
  - незахищеність від зовнішнього впливу, наприклад, падіння дерев на лінію і крадіжки проводів; незважаючи на пристрої грозозахисту, повітряні лінії також страждають від ударів блискавки. Унаслідок уразливості, на одній повітряній лінії часто обладнають два ланцюги: основну та резервну;
  - естетична непривабливість; це одна з причин практично повсюдного переходу на кабельний спосіб електропередачі в межах міста.



- **Кабельні лінії (КЛ)** проводяться під землею. Електричні кабелі мають різну конструкцію, проте можна виявити спільні елементи. Серцевиною кабелю є три струмопровідні жили (по числу фаз). Кабелі мають як зовнішню, так і междужільную ізоляцію. Звичайно як ізолятора трансформаторне масло в рідкому вигляді, або промасленим папером. Струмопровідна серцевина кабелю, як правило, захищається сталевий бронею. Із зовнішнього боку кабель покривається бітумом. Бувають колекторні і безколекторні кабельні лінії. У першому випадку кабель прокладається в підземних бетонних каналах - [колекторах](#). Через певні проміжки на лінії обладнуються виходи на поверхню у вигляді люків - для зручності проникнення ремонтних бригад в колектор. Безколекторні кабельні лінії прокладаються безпосередньо в ґрунті. Безколекторні лінії істотно дешевше колекторних при будівництві, проте їх експлуатація більш витратна в зв'язку з недоступністю кабелю. Головною перевагою кабельних ліній електропередачі (у порівнянні з повітряними) є відсутність широкої смуги відчуження. За умови достатньо глибокого закладення, різні споруди (у тому числі житлові) можуть будуватися безпосередньо над колекторної лінією. У разі бесколлекторного закладення будівництво можливе в безпосередній близькості від лінії. Кабельні лінії не псують своїм виглядом міський пейзаж, вони набагато краще повітряних захищені від зовнішнього впливу. До недоліків кабельних ліній електропередачі можна віднести високу вартість будівництва і подальшої експлуатації: навіть у разі безколекторний укладання кошторисна вартість погонного метра кабельної лінії в рази вище, ніж вартість повітряної лінії того ж [класу напруги](#). Кабельні лінії менш доступні для візуального спостереження їх стану (а в разі безколекторний укладання - взагалі недоступні), що також є суттєвим недоліком експлуатаційним.



# ***МЕРЕЖА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ***

- Мережа електропостачання (С.Е.) - різновид інженерних мереж - комплекс інженерних споруд, обладнання та апаратури, призначений для передачі електричної енергії від джерел до споживачів.
- Основними компонентами мережі електропостачання є лінії електропередач, підстанції й розподільні пристрої. У деяких випадках джерела (електростанції, генератори) і споживачі електроенергії розглядаються як частина мережі електропостачання. Часто С.Е. умовно ділиться на ділянки з різним номінальним електричною напругою.
- Класифікація мереж електропостачання
- Мережі електропостачання прийнято класифікувати за призначенням (області застосування), масштабним ознаками, і за родом струму.
  - - Мережі загального призначення: електропостачання побутових, промислових, сільськогосподарських і транспортних споживачів.
  - - Мережі автономного електропостачання: електропостачання мобільних і автономних об'єктів (транспортні засоби, судна, літаки, космічні апарати, автономні станції, роботи і т.п.)
  - - Мережі технологічних об'єктів: електропостачання виробничих об'єктів та інших інженерних мереж.

# Масштабні ознаки, розміри мережі електропостачання

- Магістральні мережі електропостачання: мережі, що зв'язують окремі регіони, країни і їх найбільші джерела і центри споживання. Характерні надвисоким і високим рівнем напруги і великими потоками потужності (гігават).  
Регіональні мережі електропостачання: мережі масштабу регіону (області, краю). Мають харчування від магістральних мереж і власних регіональних джерел живлення, обслуговують великих споживачів (місто, район, підприємство, родовище, транспортний термінал). Характерні високим і середнім рівнем напруги і великими потоками потужності (сотні мегават, гігават).

# Районні державні мережі, розподільні мережі.

- Мають живлення від регіональних мереж. Зазвичай не мають власних джерел живлення, обслуговують середніх і дрібних споживачів (внутрішньоквартальні та селищні мережі, підприємства, транспортні вузли). Характерні середнім і низьким рівнем напруги і невеликими потоками потужності

# Внутрішні мережі електропостачання.

- Розподіляють електроенергію на невеликому просторі - в рамках району міста, села, кварталу, заводу. Найчастіше мають всього 1 або 2 точки живлення від зовнішньої мережі. При цьому іноді мають власний резервне джерело живлення. Характерні низьким рівнем напруги і невеликими потоками потужності (сотні кіловат, мегавати).
- Електропроводка. Мережі самого нижнього рівня - окремої будівлі, цехи, приміщення. Найчастіше розглядаються спільно з внутрішніми мережами. Характерні низьким і побутовим рівнем напруги і маленькими потоками потужності (десятки і сотні кіловат).



## Змінний струм:

- Змінний електричний струм передається по трьом проводам таким чином, що фаза змінного струму в кожному з них зміщена щодо інших на  $120^\circ$ . Кожен провід і змінний струм в ньому називається фаза. Більшість мереж промислової електропроводки.
- Змінний однофазний струм: використовується багатьма побутовими споживачами і виходить з змінного трифазного шляхом об'єднання споживачів в групи по фазах. При цьому кожній групі споживачів виділяється одна з трьох фаз, а зворотний провід (земля) об'єднується і заземлюється.

# класи напруги

- Трифазні мережі. передають великі потужності, мають класи напруги 1150 кВ, 750 кВ, 500 кВ, 330 і 220 кВ. Мережі, передають середні потужності, мають класи напруги 220 кВ, 110 кВ, 35 кВ. Мережі, передають малі потужності, мають класи напруги 35 кВ, 10 кВ, 6 кВ. Мережі кінцевих споживачів мають клас напруги 0,4 кВ. Високовольтні мережі постійної напруги мають класи напруги 800 і 400 кВ. Як правило, генератори джерела і споживачі працюють з низьким номінальною напругою. Для передачі енергії по лініях високої напруги на виході від генератора його підвищують, а на вході споживача його знижують за допомогою трансформаторів.

## Види електропостачання зовнішнє і внутрішнє

- Під зовнішнім електропостачанням розуміють комплекс споруд, що забезпечують передавання електроенергії від пункту приєднання енергосистеми до пункту приєднання споживача.
- Внутрішнє електропостачання — комплекс мереж і підстанцій, розташованих на території споживача.

# ***РЕЖИМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ***

- Залежно від значення головних параметрів - частоти і напруги, розрізняють нормальний режим, аварійний режим, літній і зимовий режими електричних мереж.

# Нормальний режим електричних мереж

- Нормальний режим характеризується показниками, близькими до номінальних. У такому режимі забезпечується плавне регулювання роботи електростанцій, мінімізуються втрати електричної енергії в мережі, зручно здійснюються оперативні перемикання. Нормальний режим електричної мережі забезпечує постачання електроенергією споживачів без перебоїв і з достатнім рівнем напруги.
- Нормальним є також режим, коли відбувається включення-відключення лінії високої потужності трансформатора і моменти високо амплітудних перепадів напруги, які тривають частки секунд.

# Аварійний режим електричних мереж

- Режим стає аварійним в тому випадку, якщо система, при переході з одного стану норми в інше, відзначається різка зміна параметрів частоти струму і напруги. До аварійних варіантів роботи електричних мереж відносяться такі відхилення в роботі, як:
  - 1. Коротке замикання. Характеризується перевищенням номінальної напруги в десятки разів. Виявляється яскравим спалахом світла лампочки.
  - 2. Перевантаження електромережі. Дає про себе знати нагріванням розетки, вимикача, аж до їхнього загоряння.
  - 3. Стрибок струму. Слідство короткочасного перевищення напруги. При включенні, лампа розжарювання перегорає.
  - 4. Слабкий струм. Причиною може бути розрив ланцюга. В такому випадку тьмяно горить лампа розжарювання.
  - 5. Стрибок напруги. Найчастіше виникає через удари блискавки. У більшості випадків це призводить до виходу з ладу електроприладів.
  - 6. Низька напруга. Буває через часткове розриву ланцюга. При тривалому використанні низької напруги прилади виходять з ладу.

- Літній і зимовий режими електричних мереж відносяться до нормальних, однак вони характеризуються значними навантаженнями на систему в зв'язку з високими або низькими температурами і впливом несприятливих погодних умов.

# Електроенергетична система (ЕЕС)

- це сукупність електростанцій (ЕС) та електричних мереж (ЕМ), розташованих на визначеній території та зв'язаних між собою і пов'язаних спільним режимом роботи у безперервному процесі виробництва, пересилання та розподілу електроенергії в умовах загального керування цим режимом.
- Згідно с таким визначенням в ЕЕС електроенергія виробляється, пересилається та розподіляється між споживачами. Споживачі електроенергії до складу ЕЕС не належать, бо мають власні системи керування режимами та організаційно-економічного управління.
- Проте їхні електроустановки разом з електроустановками ЕЕС утворюють спільну **електричну систему**, яка відображає існування єдиного процесу генерування, пересилання, розподілу та споживання електроенергії. Електрична система є технічним об'єктом, який не має єдиної системи керування і не підлягає окремому техніко-економічному аналізу. Але вона є базою для аналізу режимів та процесів ЕЕС.



**Змістовий модуль 14. Напівпровідникові прилади.  
Лекція № 15. Тема № 14.1. Провідність напівпровідників.  
Напівпровідниковий діод.**

**План лекції**

1. Загальні відомості про напівпровідники
2. Напівпровідникові діоди
3. Стабілітрони і їх застосування

**1. Загальні відомості про напівпровідники**

*Напівпровідниками* називають речовини, питомі провідності яких має проміжне значення між питомими провідностями металів і діелектриків. Напівпровідники одночасно є поганими провідниками й діелектриками. Границя між напівпровідниками й діелектриками умовна, тому що діелектрики при високих температурах можуть поводитися як напівпровідники, а чисті напівпровідники при низьких температурах поведуться як діелектрики. У металах концентрація електронів практично не залежить від температури, а в напівпровідниках носії заряду виникають лише при підвищенні температури або поглинанні енергії від іншого джерела.

Типовими напівпровідниками є **вуглець (C)**, **германій (Ge)** і **кремній (Si)**. Германій - це тендітний сірувато-білий елемент, відкритий в 1886 г. Кремній був відкритий в 1823 г. Він широко розповсюджений у земній корі у вигляді кремнезему (двоокису кремнію), силікатів і алюмосилікатів. Двоокисом кремнію багаті пісок, кварц, агат і кремій. Із двоокису кремнію  $SiO_2$  хімічним шляхом одержують чистий кремій. Кремій є найбільше широко використовуваним напівпровідниковим матеріалом. Розглянемо докладніше утворення електронів провідності в напівпровідниках на прикладі кремнію. Атом кремнію має порядковий номер  $Z = 14$  у періодичній системі Менделєєва. Тому до складу його атома входять 14 електронів.

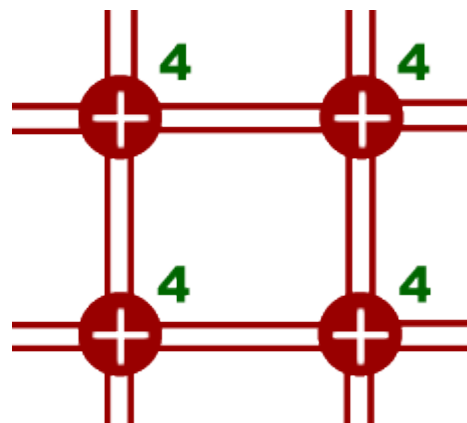
Однак тільки **чотири** з них перебувають на незаповненій зовнішній оболонці і є слабо зв'язаними.

Ці електрони називаються **валентними** й обумовлюють чотири валентності кремнію. Атоми кремнію здатні поєднувати свої валентні електрони з іншими атомами кремнію за допомогою так званого **ковалентного зв'язку** (мал. 1). При ковалентному зв'язку валентні електрони спільно використовуються різними атомами, що приводить до утворення кристала (мал. 2).

При відсутності домішок і температури, близької до абсолютного нуля, усі валентні електрони атомів у кристалі кремнію взаємно зв'язані й вільних електронів немає, так що кремній не має провідності.



Мал. 1. Парноелектронний (ковалентний) зв'язок атомів кремнію



Мал. 2. Зв'язки в кристалічній решітці кремнію

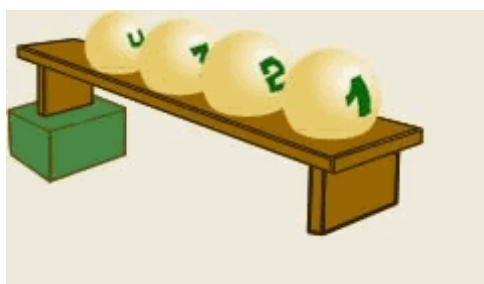
При підвищенні температури або при опроміненні збільшується енергія електронів, що приводить до часткового порушення ковалентних зв'язків і появи вільних електронів. Уже при кімнатній температурі під дією зовнішнього електричного поля вільні електрони переміщуються й у кристалі виникає електричний струм.

Електропровідність, обумовлена переміщенням вільних електронів, називається **електронною провідністю** напівпровідника, або ***n* – провідністю** (negative).

З появою вільних електронів у ковалентних зв'язках утворюється вільне не заповнене електроном (вакантне) місце - «**електронна дірка**».

Через те, що дірка виникла в місці відриву електрона від атома, то в області її утвору виникає надлишковий позитивний заряд.

При наявності дірки який-небудь із електронів сусідніх зв'язків може зайняти місце дірки й нормальний ковалентний зв'язок у цьому місці відновиться, але буде порушена в тому місці, звідки пішов електрон. Нову дірку може зайняти ще який-небудь електрон і т.д. (мал. 3).



Мал. 3. Переміщення дірок

Під дією зовнішнього електричного поля дірки переміщуються в напрямку сил поля, тобто протилежно переміщенню електронів.

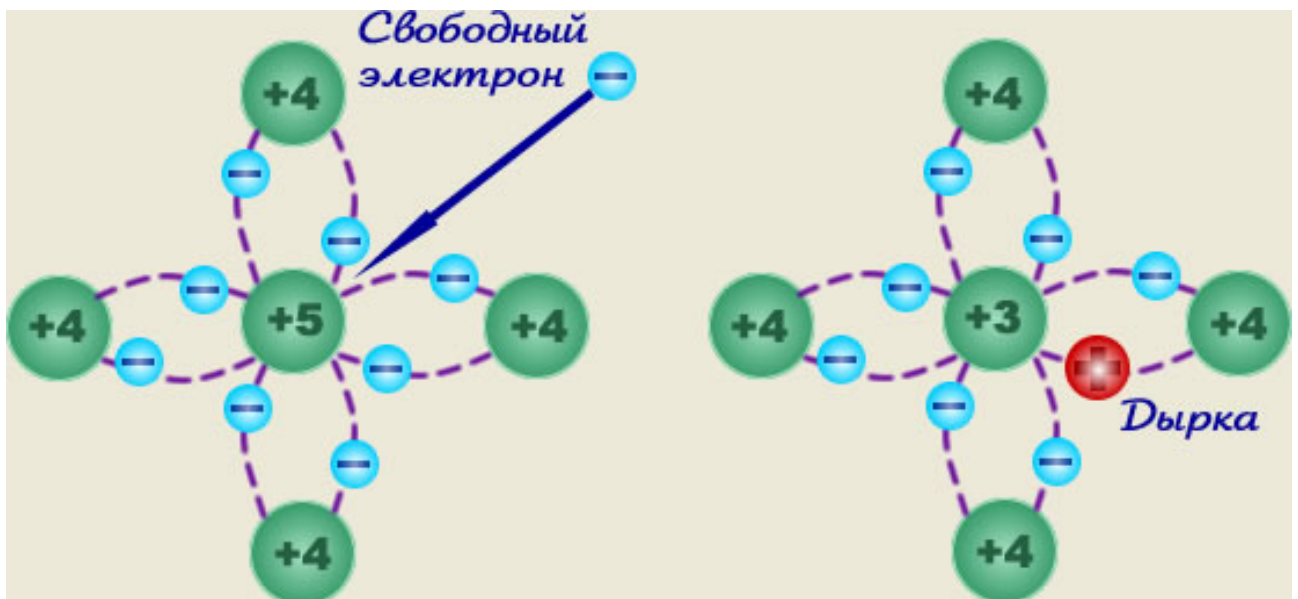
Провідність, що виникає в результаті переміщення дірок, називається **дірковою провідністю**, або **p- провідністю** (positive).

У кристалі чистого напівпровідника при порушенні ковалентних зв'язків виникає однакове число вільних електронів і дірок. Одночасно із цим відбувається зворотний процес - **рекомбінація**, при якій вільні електрони заповнюють дірки, утворюючи нормальні ковалентні зв'язки.

При певній температурі число вільних електронів і дірок в одиниці об'єму напівпровідника в середньому залишається постійним. При підвищенні температури число вільних електронів і дірок сильно зростає й провідність напівпровідника значно збільшується (особливо германія). (У цьому істотну відмінність напівпровідників від металів, у яких з підвищенням температури провідність зменшується). *Електропровідність напівпровідника при відсутності в ньому домішок називається його **власною електропровідністю**.*

Властивості напівпровідника в сильному ступені міняються при наявності в ньому незначної кількості домішок. Уводячи в кристал напівпровідника атоми інших елементів, можна одержати в кристалі перевагу вільних електронів над дірками або, навпаки, перевагу дірок над вільними електронами.

Додавання домішок у напівпровідникові матеріали називається **легуванням**. При заміщенні в кристалічних ґратах атома германія атомом *n'*-валентної речовини (миш'яку, сурми, фосфору) *чотири* електрони цієї речовини утворюють заповнені зв'язки із сусідніми атомами германія, а *n'*-тий електрон виявиться вільним (мал.4, а), тому така домішка збільшує електронну провідність (**n-провідність**) і називається **донорною**.



Мал. 4, а). Донорна домішка

Мал. 4, б). Акцепторна домішка

При заміщенні атома германія атомом *тривалентної* речовини (індій, галій, алюміній) його електрони вступають у ковалентний зв'язок із *трьома* сусідніми атомами германія, а зв'язки із *четвертим* атомом германія будуть відсутні, тому що в індію немає четвертого електрона (мал. 4, б).

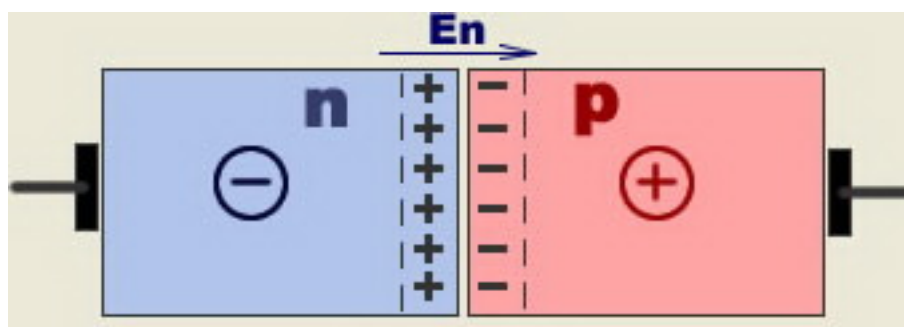
Відновлення всіх ковалентних зв'язків можливо, якщо відсутній четвертий електрон буде отриманий від найближчого атома кремнію. Але в цьому випадку на місці електрона, що покинув атом кремнію, з'явиться дірка, яка може бути заповнена електроном із сусіднього атома кремнію. Послідовне заповнення вільного зв'язку еквівалентно руху дірок.

*Домішки з меншим числом валентних електронів в атомі в порівнянні з атомом даного напівпровідника викликають перевагу діркової провідності й називаються акцепторними.*

*Носії заряду, що визначають вид провідності в примесном напівпровіднику, називаються основними (дірки в р-напівпровіднику й електрони в n-напівпровіднику), а носії заряду протилежного знака - неосновними.*

## 2. Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковий діод являє собою контактне з'єднання двох напівпровідників, один з яких з електронною провідністю (n-типу), а іншої - з дірковою (p-типу, мал.5).



Мал. 5. Утворення  $p - n$  переходу

Внаслідок великої концентрації електронів у напівпровіднику n-типу буде відбуватися дифузія їх з першого напівпровідника в другий. Аналогічно буде відбуватися дифузія дірок із другого напівпровідника p-типу в перший n-типу.

У тонкому прикордонному шарі напівпровідника n-типу виникає позитивний заряд, а в прикордонному шарі напівпровідника p-типу - негативний заряд. Між цими шарами виникає різниця потенціалів (*потенційний бар'єр*) і утворюється електричне поле напруженістю  $E_p$ , яка перешкоджає дифузії електронів і дірок з одного напівпровідника в іншій.

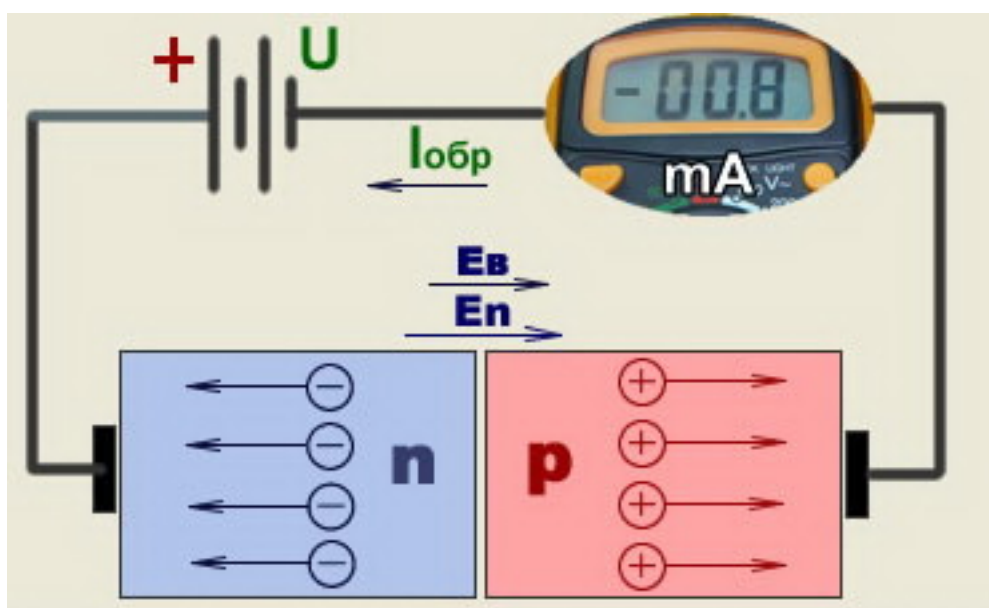
Таким чином, на границі двох напівпровідників виникає тонкий шар, збіднений носіями зарядів (електронів і дірок), що володіє великим опором. Цей шар називається замикаючим (рос. – «запирающим») р-п-переходом.

Внаслідок теплового руху в електричне поле р-п-переходу попадають неосновні носії зарядів (електрони з р-області й дірки з п-області).

*Рух неосновних носіїв зарядів під дією сил поля р-п-переходу спрямований зустрічно дифузійному струму основних носіїв і називається дрейфовим або тепловим струмом, що залежить у сильному ступені від температури. При відсутності зовнішнього електричного поля дрейфовий струм урівноважується дифузійним і сумарний струм через р-п-перехід дорівнює нулю.*

З'єднавши позитивний затискач джерела живлення з металевим електродом напівпровідника п-типу, а негативний затискач із електродом напівпровідника р-типу, одержимо зовнішнє електричне поле  $E_{в}$ , спрямоване згідно з полем р-п-переходу  $E_{п}$ , що підсилює його (мал. 6).

Таке поле ще більше буде перешкоджати проходженню основних носіїв зарядів через замикаючий шар і через діод пройде малий зворотний струм  $I_{обр}$ , обумовлений неосновними носіями заряду.

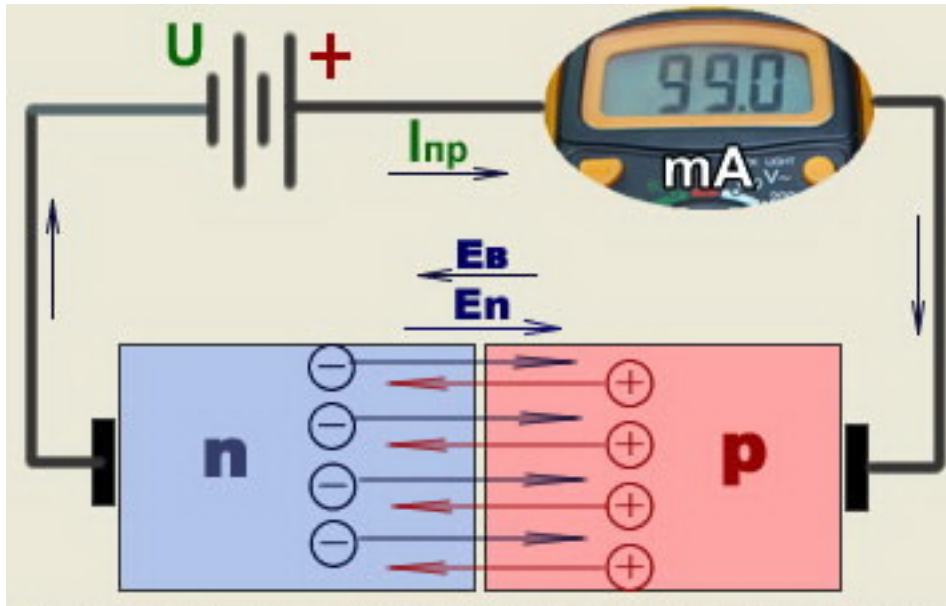


Мал. 6. Включення р – п переходу у зворотному напрямку

При зміні полярності джерела живлення (мал. 7) зовнішнє електричне поле  $E_{в}$  виявиться спрямованим зустрічно полю р-п-переходу  $E_{п}$  і під дією цього поля електрони й дірки почнуть рухатися назустріч один одному й число основних носіїв заряду в перехідному шарі зросте, зменшуючи потенційний бар'єр і опір перехідного шару.

Таким чином, у ланцюзі встановлюється прямий струм  $I_{пр}$ . Діод проводить струм у прямому напрямку тільки тоді, коли величина зовнішньої напруги (у вольтах) більше потенційного бар'єра (в електрон-вольтах). Для

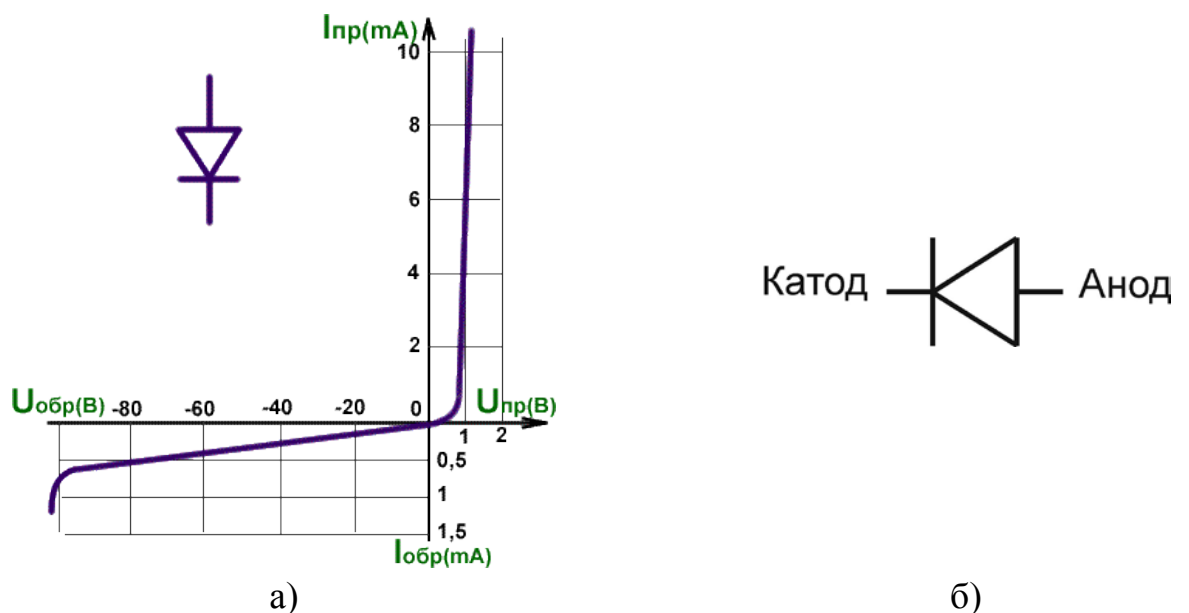
германієвого діода мінімальна зовнішня напруга рівна 0,3 В, а для кремнієвого - 0,7 В.



Мал. 7. Включення  $p - n$  переходу в прямому напрямку

Коли діод починає проводити струм, на ньому з'являється спадання напруги, яка дорівнює потенційному бар'єру й називається *прямим спаданням напруги*.

На мал. 8 показана вольт-амперна характеристика діода і його умовна позначка.  $p$ -частина представлена стрілкою, а  $n$ -частина - рисою. Прямий струм тече від частини  $p$  до  $n$  ( по стрілці). Частина  $n$  називається катодом, а частина  $p$  - анодом. Для більшої наочності пряма галузі (права частина графіка) і зворотна галузі (ліва частина графіка) характеристики зображені в різних масштабах.



Мал. 8. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) діода (а) і його умовне графічне позначення (б)

Характеристика показує, що при невеликій прямій напрузі  $U_{пр} = 1В$  на затискачах діода в його ланцюзі проходить великий струм. Коли ж до р-n-переходу прикладена зворотна напруга, струм дуже малий, швидко досягає насичення й не змінюється до деякого граничного значення зворотної напруги, після чого різко зростає. Це так звана *напруга пробою*, при якій настає пробій р-n-переходу й він руйнується.

*Таким чином, напівпровідниковий діод має одnobічну провідність, тобто є електричним вентилем.*

Після формування р-n-переходу діод потрібно помістити в корпус, щоб захистити його від впливу навколишнього середовища й механічних ушкоджень. Корпус повинен також забезпечити можливість з'єднання діода з ланцюгом. Вид корпусу визначається призначенням діода (мал. 9). Якщо через діод повинен протікати великий струм, корпус повинен бути розрахований так, щоб уберегти р-n-перехід від перегріву.



Мал. 9. Напівпровідникові діоди

### 3. Стабілітрони і їх застосування

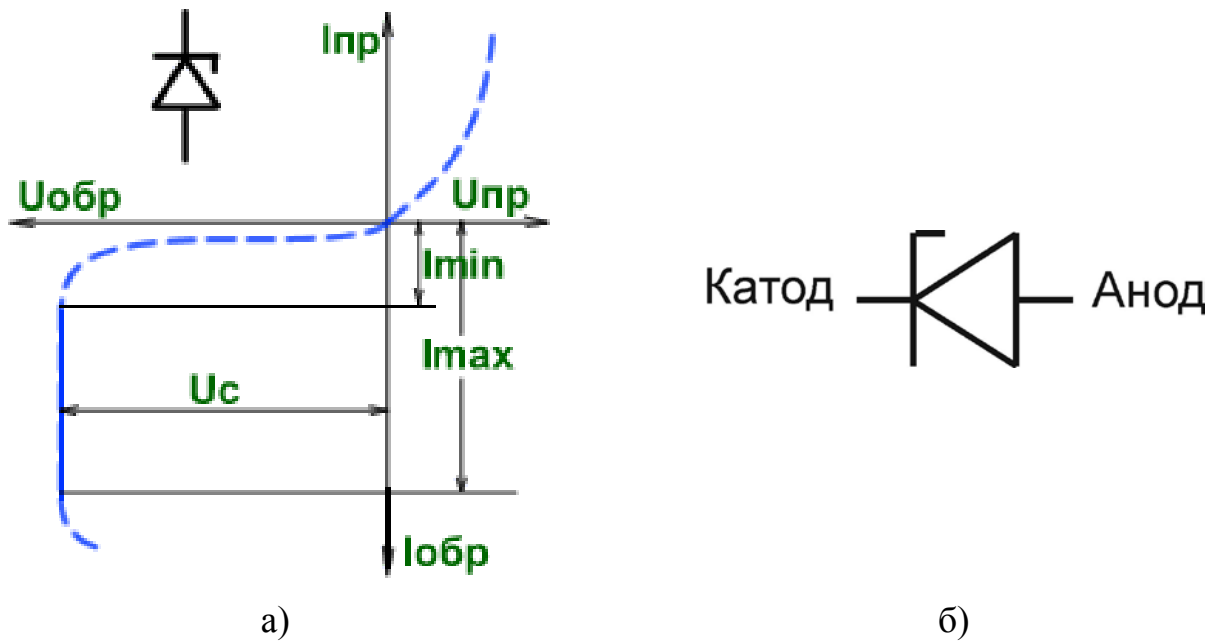
Для роботи при напругах, що перевищують напругу пробою діода, призначені спеціальні діоди, які називаються стабілітронами (Zener diode).

У цьому випадку область зворотних напруг, при якій настає пробій, називається областю стабілізації.

Коли зворотна напруга достатня велика, щоб викликати пробій стабілітрона, через нього тече високий зворотний струм. До настання пробою зворотний струм невеликий, після різко зростає. Це відбувається тому, що опір стабілітрона зменшується при збільшенні зворотної напруги.

Стабілітрони випускають із певною напругою пробою, яку називають напругою стабілізації  $U_c$  (мал. 10). Паспортна напруга пробою - зворотна напруга при струмі стабілізації, який трохи менше максимального струму стабілізації  $I_{max}$  (максимальний зворотний струм, який може текти через

стабілітрон без перевищення максимально допустимої потужності, що розсіюється, зазначеної виробником).



Мал. 10. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) стабілітрона (а) і його умовне графічне позначення (б)

Корпуса стабілітронів мають таку ж форму, як і у звичайних діодів.

Малопотужні стабілітрони (мал. 11) випускаються в корпусах зі скла або епоксидної смоли, а потужні - у металевому корпусі із гвинтом.



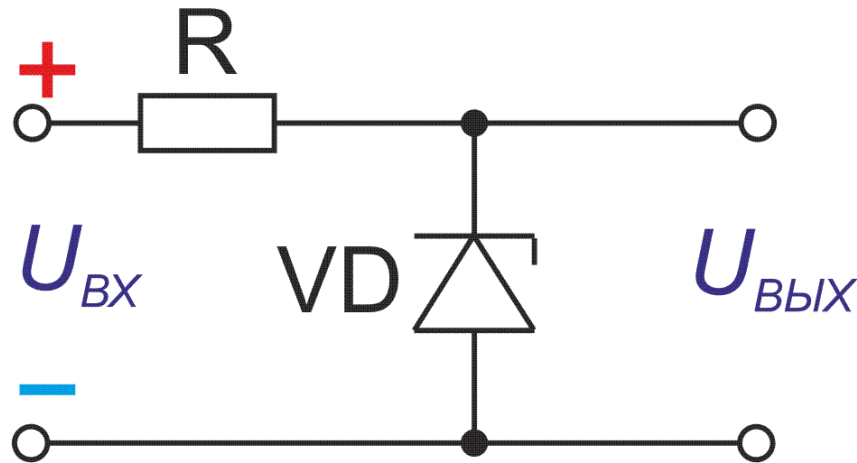
Мал. 11. Напівпровідникові стабілітрони

Стабілітрони використовують для стабілізації напруги.

На мал. 12 показаний типовий регулюючий ланцюг зі стабілітроном. Стабілітрон  $VD$  з'єднаний послідовно з резистором  $R$ . Резистор обумовлює проходження через стабілітрон робочого струму (при якому стабілітрон працює в



режимі пробою (стабілізації)). Вхідна постійна напруга  $U_{BX}$  повинна бути вище напруги стабілізації  $U_C$  стабілітрона. Спадання напруги на стабілітроні дорівнює напрузі стабілізації стабілітрона:  $U_{ВЫХ} = U_C$ . Спадання напруги на резисторі дорівнює різниці вхідної напруги й напруги стабілізації:  $U_R = U_{BX} - U_C$ .



Мал. 12. Стабілізація напруги

Вхідна напруга може збільшуватися або зменшуватися, що обумовлює відповідне збільшення або зменшення струму через стабілітрон. Коли стабілітрон працює при напрузі стабілізації (в області пробою), при збільшенні вхідної напруги через нього може йти великий струм. Однак напруга на стабілітроні залишиться колишньою. Стабілітрон виявляє протидію збільшенню вхідної напруги, тому що при збільшенні струму його питомий опір падає, що дозволяє вихідній напрузі на стабілітроні залишатися постійною при змінах вхідної напруги. Зміна вхідної напруги проявляється тільки в зміні спадання напруги на послідовно включеному резисторі. Сума спадань напруги на цьому резисторі й стабілітроні дорівнює вхідній напрузі. Вихідна напруга знімається зі стабілітрона й може бути збільшена або зменшена шляхом заміни стабілітрона й включеного послідовно з ним резистора.

### Питання для самоконтролю

1. Які речовини називають напівпровідниками й чому?
2. Що називають власною електропровідністю напівпровідника? Що означає n-провідність і p-провідність?
3. Що являє собою легування? Які домішки називають донорними, а які – акцепторними?
4. У яких випадках носії заряду в напівпровіднику вважаються основними, а в яких – неосновними?

5. Як улаштований р-п перехід і напівпровідниковий діод? Зобразите вольт-амперну характеристику діода.
6. У чому принципова відмінність стабілітрона від звичайного діода?

### **Список літератури**

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – §§ 16.1 – 16.6 (с. 457 – 488).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §§11.1 – 11.3 (с. 260 – 276).
3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – глава 12, §§ 12.1 – 12.6 (с. 311 – 335).

**Змістовий модуль 14. Напівпровідникові прилади.  
Лекція № 16. Тема № 14.2. Біполярний транзистор.**

**План лекції**

- 1. Принцип роботи біполярного транзистора*
- 2. Схеми включення транзисторів*
- 3. Характеристики транзисторів*

**1. Принцип роботи біполярного транзистора**

У 1948 р. Джон Бардін, Уолтер Браттейн і Вільям Шоклі в лабораторіях фірми Bell виготовили перший працюючий транзистор.

Напевно, жодне з відкриттів сучасної фізики не вплинуло настільки безпосередньо на життя людей, як транзистор. Завдяки своїм перевагам перед електронною лампою транзистор (мал. 1) зробив революцію в області електронних засобів зв'язку й забезпечив створення й широке використання швидкодіючих ЕОМ з великим обсягом пам'яті.

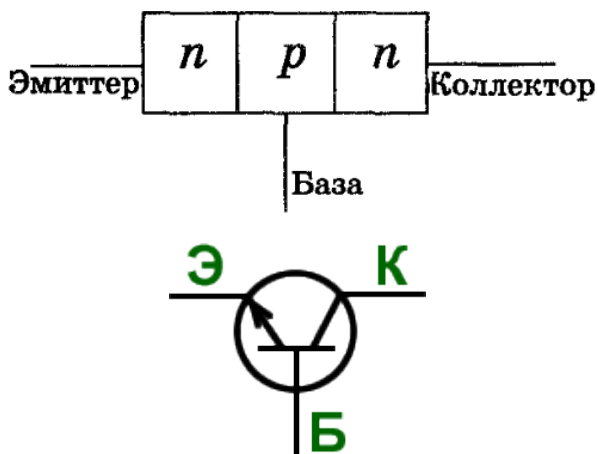


Мал. 1. Біполярні транзистори

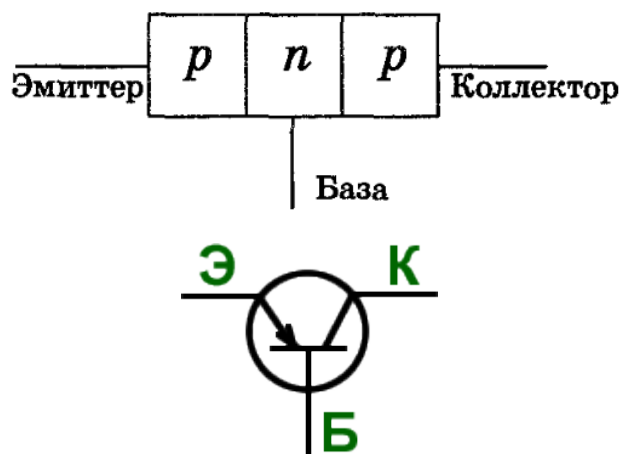
**Транзистором** називається напівпровідниковий прилад с двома р-n-переходами, призначений для посилення й генерування електричних коливань, що представляє собою пластину кремнію або германія, яка складається із трьох областей. Дві крайні області завжди мають однаковий тип провідності, а середня – з протилежною провідністю.

Транзистори, у яких крайні області мають електронну провідність, а середня - діркову провідність, називаються транзисторами n-p-n - типу (мал. 2);

транзистори, у яких крайні області мають діркову, а середня - електронну проводимість - транзисторами р-п-р - типу (мал. 3).



Мал. 2. Транзистор  $n - p - n$



Мал. 3. Транзистор  $p - n - p$

Фізичні процеси, що відбуваються в транзисторах двох типів, аналогічні й відмінність між ними полягає в тому, що полярності включення джерел живлення їх протилежні, а також у тому, що якщо в транзисторі п-р-п- типу електричний струм створюється в основному електронами, то в транзисторі р-п-р - типу - дірками.

Суміжні області, відділені друг від друга р-п-переходами, називаються емітером Е, базою Б і колектором К.

Емітер є областю, що випускає (емітує) носії зарядів (електронів у транзисторі р-п-типу й дірок у транзисторі п-р-типу), колектор - область, що збирає носії зарядів, база - середня область, основа.

В умовах роботи транзистора до лівого р-п-переходу прикладається напруга емітер - база  $U_E$  в прямому напрямку, а до правого р-п-переходу - напруга база - колектор  $U_K$  - у зворотному.

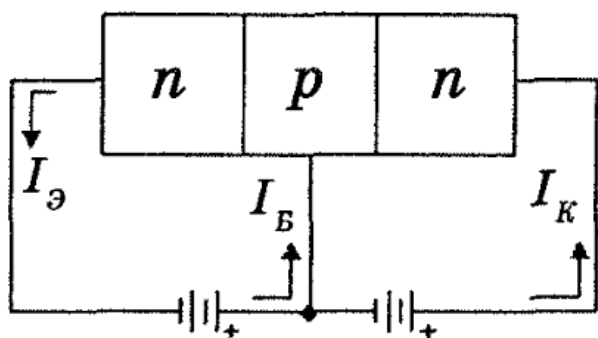


Рис. 4. Схема включення транзистора структури  $n - p - n$

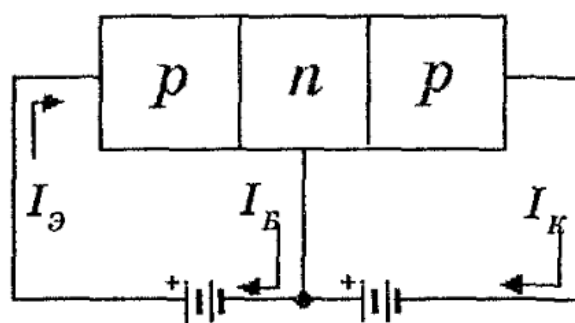


Рис. 5. Схема включення транзистора структури  $p - n - p$

Під дією електричного поля більша частина носіїв зарядів з лівої області (емітера), долаючи р-п-перехід, переходить у дуже вузьку середню область (базу). Далі велика частина носіїв зарядів продовжує рухатися до другого переходу й, наближаючись до нього, попадає в електричне поле, створене зовнішнім джерелом  $U_K$ .

Під впливом цього поля носії зарядів втягуються в праву область (колектор), збільшуючи струм у ланцюзі батареї  $U_K$ .

Якщо збільшити напругу  $U_E$ , то зросте кількість носіїв зарядів, перешедших з емітера в базу, тобто збільшиться струм емітера на деяку величину  $\Delta I_E$ . При цьому також збільшиться струм колектора на величину  $\Delta I_K$ .

У базі незначна частина носіїв зарядів, перешедших з емітера, рекомбінує з вільними носіями зарядів протилежної полярності, зменшення яких поповнюється новими носіями зарядів із зовнішнього ланцюга, що утворюють струм бази  $I_B$ .

*Таким чином, струм колектора  $I_K = I_E - I_B$  виявиться менше струму емітера, незначно відрізняючись від останнього. Відношення  $\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$  при  $U_K = \text{const}$  називається коефіцієнтом підсилення по струму й звичайно має значення  $\alpha = 0,9 \dots 0,995$ .*

Через те, що лівий (емітерний) р-п-перехід перебуває під прямою напругою, то він має малий опір. На правий же (колекторний) р-п-перехід впливає зворотна напруга й він має великий опір. Тому напруга, що прикладається до емітера, досить мала (десяті частки вольт), а напруга, що подається на колектор, може бути досить великою (до декількох десятків вольтів).

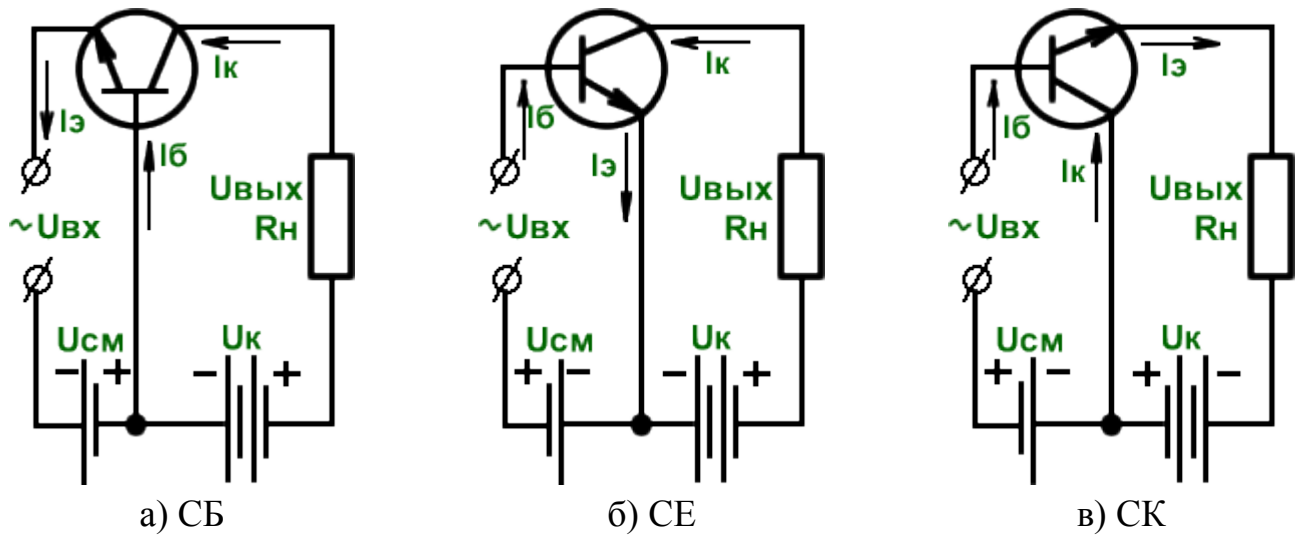
Зміна струму в ланцюзі емітера, викликана малою напругою  $U_E$ , створює приблизно таку ж зміну струму в ланцюзі колектора, де діє значно більша напруга  $U_K$ , у результаті чого транзистор здійснює посилення потужності.

## 2. Схеми включення транзисторів.

При роботі транзистора як підсилювача електричних коливань вхідну змінну напругу  $U_{ВХ}$  (сигнал, що підлягає посиленню) подають послідовно із джерелом постійної напруги зсуву  $U_{см}$  між емітером і базою, а вихідна напруга  $U_{ВІХ}$  (посилений сигнал) знімається з навантажувального резистора  $R_H$ .

Можливі три схеми включення транзисторів, розглянемо їх на прикладі транзистора структури  $n - p - n$  (мал. 6): із спільною базою СБ (а), із спільним емітером СЕ (б) і із спільним колектором СК (в). Назва схеми показує, який

електрод транзистора є спільним для вхідного і вихідного ланцюгів. Схеми включення транзисторів відрізняються своїми властивостями, але принцип посилення коливань залишається однаковим.



Мал. 6. Схеми включення транзистора структури  $n - p - n$ .

### *Схема із спільною базою (СБ)*

У схемі із спільною базою позитивне збільшення напруги на вході  $\Delta U_{вх}$  викликає збільшення струму емітера  $I_E$ , що приводить до збільшення як струму колектора  $I_k$ , так і напруги виходу  $\Delta U_{вих}$ , причому  $\Delta U_{вих} \gg \Delta U_{вх}$ .

У схемі із СБ джерело вхідної напруги включене у ланцюг емітер - база, а навантаження й джерело живлення - у ланцюг колектор - база.

Вхідний опір схеми із СБ малий (декілька ом або десятків ом), тому що емітерний перехід включений у прямому напрямку. Вихідний опір схеми, навпаки, великий (сотні кілоом), тому що колекторний перехід включений у зворотному напрямку.

Малий вхідний опір схеми із СБ є істотним її недоліком, що обмежує застосування її в підсилювачах. Через джерело вхідного сигналу в цій схемі проходить увесь струм емітера, і посилення по струму не відбувається (коефіцієнт підсилення по струму  $\alpha < 1$ ). Посилення по напрузі й по потужності в цій схемі може досягати декількох сотень.

### *Схема із спільним емітером (СЕ)*

У схемі із спільним емітером СЕ джерело вхідної напруги включене у ланцюг емітер - база, а опір навантаження  $R_{н}$  і джерело живлення - у ланцюг

емітер - колектор, тому емітер є спільним електродом для вхідного і вихідного ланцюгів.

Вхідний опір схеми з СЕ більше, чим у схеми із СБ, тому що вхідним струмом у ній є струм бази, який набагато менше струму емітера й струму колектора. Цей опір становить сотні ом. Вихідний опір схеми з СЕ великий й може становити до ста кілоом.

Коефіцієнт підсилення по струму  $\beta$  у цій схемі визначається як відношення збільшення струму колектора  $I_K$  до збільшення струму бази  $I_B$  при постійній напрузі на колекторі, тобто  $\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$  при  $U_K = \text{const}$  і може мати значення  $\beta = 10 \div 200$  для різних транзисторів.

Враховуючи рівності  $I_E = I_K + I_B$  і  $\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$ , одержимо

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E - \Delta I_K} = \frac{\frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}}{1 - \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Коефіцієнт підсилення по напрузі  $K_U$  для схеми з СЕ того ж порядку, що й для схеми із СБ. Коефіцієнт підсилення по потужності  $K_P = K_U K_I$  у багато разів більше, чим у схемі із СБ.

У схемі із спільним емітером СЕ при посиленні вхідної напруги відбувається поворот фази вихідної напруги на половину періоду, тобто на  $180^\circ$ , як це видно зі схеми: позитивні збільшення вхідної напруги викликають негативне збільшення вихідної й навпаки.

### ***Схема із спільним колектором (СК)***

У схемі із спільним колектором СК джерело вхідної напруги включається в ланцюг бази, а джерело живлення й опір навантаження - у ланцюг емітера. Вхідним струмом є струм бази, а вихідним - струм емітера.

Коефіцієнт підсилення по струму для цієї схеми

$$K_I = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_E - \Delta I_K} = \frac{1}{1 - \alpha}.$$

Вхідний опір схеми з СК великий (десятки кілоом), а вихідний опір малий (до  $1 \div 2$  кОм).

Коефіцієнт підсилення по напрузі схеми із спільним колектором ОК -  $K_U = 0,9 \div 0,95$ , тобто близький до одиниці, і цю схему часто називають емітерним повторювачем.

Схема із спільним колектором СК використовується для узгодження окремих каскадів посилення, джерела сигналу або навантаження з підсилювачем.

Зведемо параметри схем включення транзисторів у таблицю 1.

Таблиця 1. Параметри схем включення транзисторів

	Схема із СБ	Схема з СЕ	Схема з СК
Коефіцієнт підсилення по струму $K_I$	$\alpha < 1$	$\beta = 10 \dots 200$	десятки раз
Коефіцієнт підсилення по напрузі $K_U$	до декількох сотень	до декількох сотень	0,9...0,95
Коефіцієнт підсилення по потужності $K_P = K_U \cdot K_I$	до декількох сотень	до декількох тисяч	десятки раз
Вхідний опір $R_{BX} = \frac{\Delta U_{BX}}{\Delta I_{BX}}$	одиниці-десятки Ом	сотні Ом	десятки кОм
Вихідний опір $R_{BLY} = \frac{\Delta U_{BLY}}{\Delta I_{BLY}}$	сотні кОм	десятки кОм	до 1...2 кОм

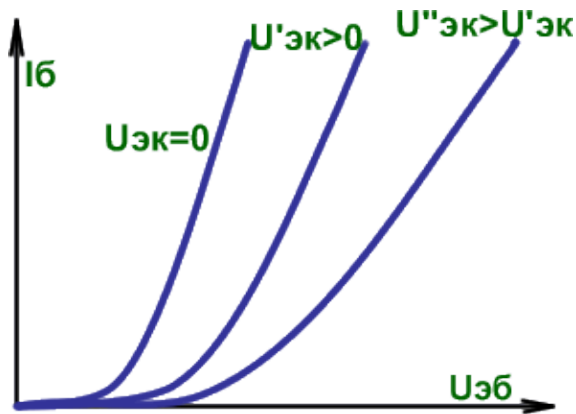
### 3. Характеристики транзисторів.

Характеристиками транзистора називаються залежності між струмами й напругами у вхідному і вихідному ланцюгах. При різних схемах включення транзистора вхідні й вихідні ланцюги різні, отже, і характеристики являють собою залежності різних величин для кожної схеми включення.

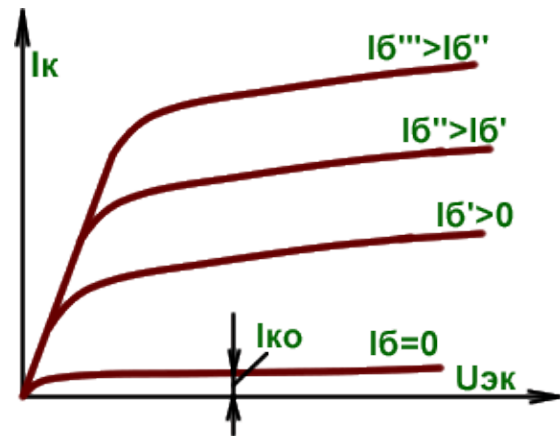
Так, для схеми із спільним емітером СЕ вхідним ланцюгом є ланцюг бази й вхідна характеристика (мал. 7) відбиває залежність струму бази від напруги емітер - база при постійній напрузі між емітером і колектором, тобто  $I_B = f(U_{BE})$  при  $U_{KE} = \text{const}$ .

Вихідним ланцюгом для цієї схеми є ланцюг колектора й вихідною характеристикою (мал. 8) - залежність струму колектора від напруги емітер - колектор при незмінному струмі бази, тобто  $I_K = f(U_{EK})$  при  $I_B = \text{const}$ .





Мал. 7. Вхідні характеристики.



Мал. 8. Вихідні характеристики.

При малих значеннях напруги між емітером і базою ( $U_{EB}$ ) струм бази росте повільно через великий опір р-п-переходу, який зі збільшенням струму зменшується.

Зі збільшенням колекторної напруги  $U_{EK}$  вхідні характеристики зміщаються вправо, тобто зі збільшенням  $U_{EK}$  необхідно підвищити напругу  $U_{EB}$ , для того щоб струм бази залишився незмінним. Вихідні характеристики показують, що в робочій області напруга  $U_{EK}$  незначно впливає на колекторний струм  $I_K$ , тому що в основному він залежить від кількості електронів, інжектованих у базу, тобто від струму емітера.

Транзистори в порівнянні з електронними лампами мають наступні переваги: більшу механічну міцність і довговічність, постійну готовність до роботи, малі габарити й масу, низьку напругу живлення й високий к.к.д.; крім того, відсутній ланцюг розжарення й, отже, спрощена схема й немає споживання потужності для розігріву катода.

До недоліків транзисторів належать залежність режиму роботи його від температури навколишнього середовища, невелика вихідна потужність, чутливість до перевантажень, розкид параметрів, внаслідок якого окремі транзистори одного типу значно відрізняються один від одного по своїх параметрах, велика відмінність між вхідними й вихідними опорами.

### Питання для самоконтролю

1. Як улаштований транзистор?
2. Які два типи біполярних транзисторів існують?
3. Як називаються електроди біполярного транзистора?
4. Намалюйте схематичні позначення  $n-p-n$  та  $p-n-p$  транзисторів.
5. Для чого використовують транзистори?

## Список літератури

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – § 16.7 (с. 489 – 498).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §11.5 (с. 285 – 289).
3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – глава 12, § 12.7 (с. 336 – 343).

**Змістовий модуль 14. Напівпровідникові прилади.  
Лекція № 17. Тема № 14.3. Польовий транзистор. Тиристор**

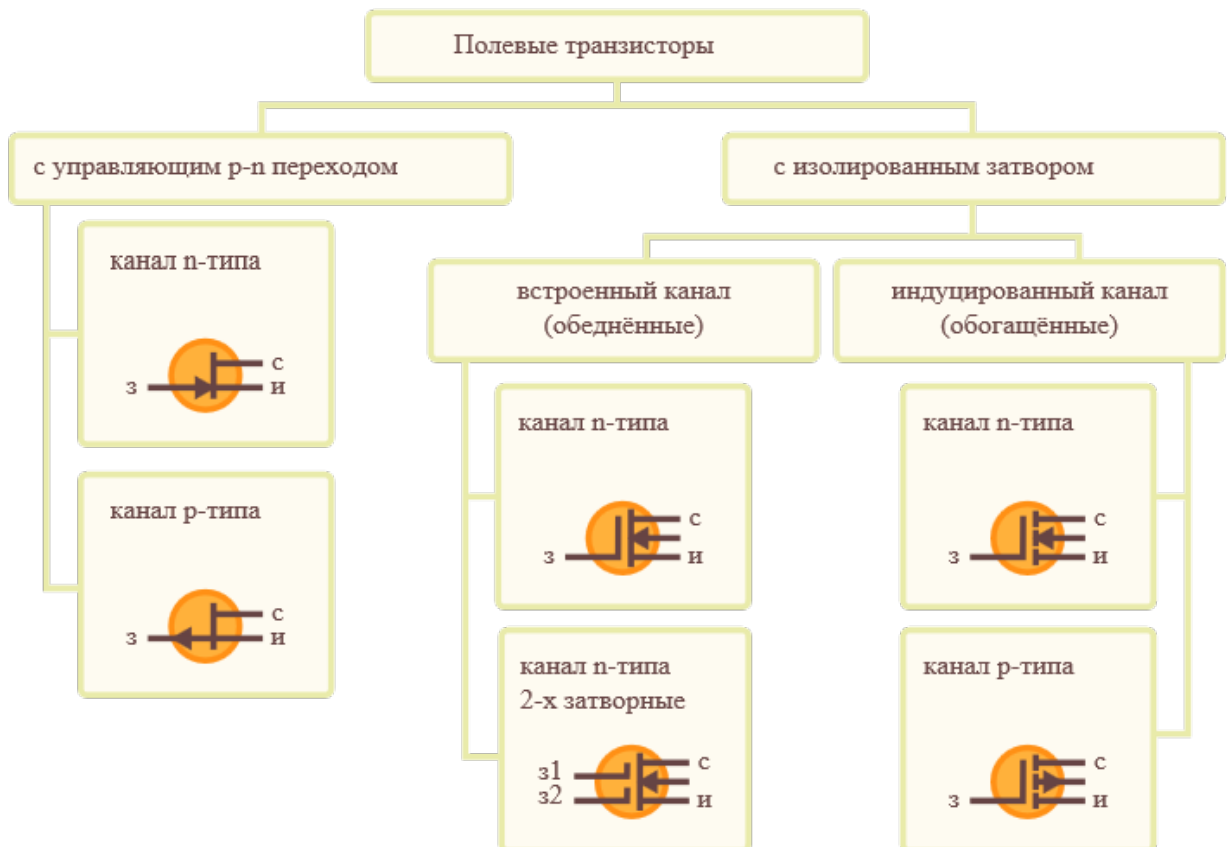
**План лекції**

1. Польові транзистори
2. Тиристори

**1. Польові транзистори**

В основу польових транзисторів (мал. 1) покладені фізичні принципи, які відомі давно, однак їх реалізація зустріла істотні технічні труднощі. Тільки в 1960-х рр. польові транзистори почали широко застосовувати в різних областях електроніки.

У польових транзисторах використовують ефект впливу поперечного електричного поля на провідність каналу, по яким рухаються носії електричного заряду.



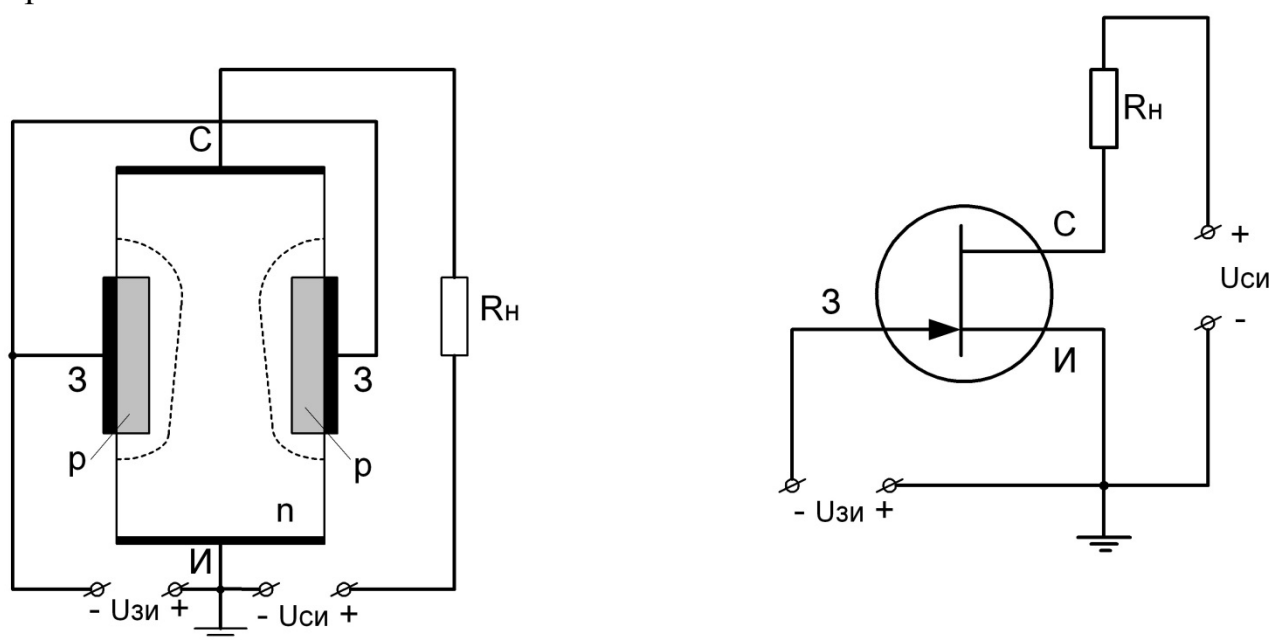
Мал. 1. Класифікація польових транзисторів

Польові каналні транзистори мають істотні переваги, до яких насамперед належать: великий вхідний опір приладів ( $10^{10} - 10^{15}$  Ом); більша

стійкість до проникаючих випромінювань (допускається рівень випромінювання на 3-4 порядки більший, ніж для біполярних транзисторів), малий рівень власних шумів, малий вплив температури на підсилювальні властивості.

*Польові транзистори виготовляють двох типів: із затвором у вигляді  $p-n$ -переходу й ізольованим затвором.*

Устрій транзистора із затвором у вигляді  $p-n$ -переходу схематично представлено на мал. 2.



Мал. 2. Схематичне зображення й схема включення польового транзистора з  $p-n$ -переходом і  $p$ -затвором: И - витік; С - стік.

Основу приладу становить слабколегована напівпровідникова пластина  $n$ -типу, до торців якої прикладена напруга  $U_C$ , що створює струм  $I_C$  через опір навантаження  $R_H$ . У напівпровідниковій пластині цей струм забезпечується рухом основних носіїв заряду. Торець пластини, від якого рухаються носії заряду, називається витіком. Торець, до якого рухаються носії заряду, - стік. У дві протилежні бічні поверхні основної  $n$ -пластини вплавлені пластинки типу  $p$ . На границі розділу пластин  $n$  і  $p$  виникають електронно-діркові переходи. До цих переходів у непровідному напрямку прикладена вхідна напруга  $U_{BX}$ . Значення напруги  $U_{BX}$  можна міняти при обов'язковім збереженні зазначеної на малюнку полярності джерела зсуву. Звичайно  $U_{BX}$  складається із двох складових: змінної напруги керуючого сигналу й постійної складовій початкового зсуву, значення якої перевищує амплітуду сигналу. Пластини  $p$ -типу утворюють затвор. При зазначеній полярності напруги на затворі навколо цих пластин утворюється шар, збіднений носіями заряду й, отже, має малу

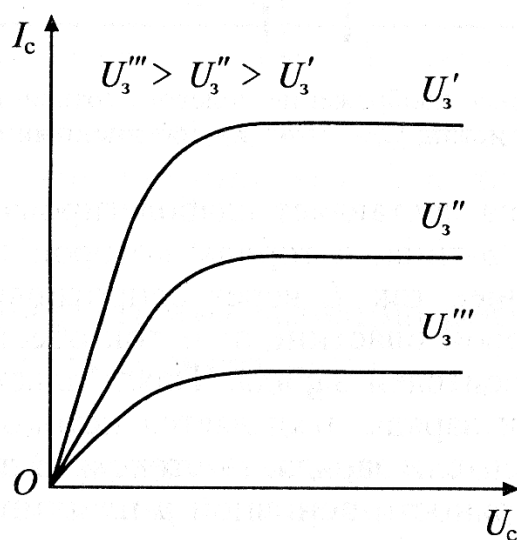
провідність. Між збідненими шарами зберігається канал з високою провідністю.

Принцип дії польового транзистора заснований на зміні ширини збідненого шару при зміні зворотної напруги  $p-n$ -переходу. Зі збільшенням напруги на затворі ширина збіднених шарів збільшується, а поперечний переріз каналу і його провідність зменшуються.

Таким чином, змінюючи напругу  $U_{зв}$  на затворі, можна міняти струм через опір навантаження  $R_H$  й вихідна напруга  $U_{вих}$  на ньому.

Роботу польового транзистора прийнято характеризувати залежністю струму стоку  $I_C$  від напруги між витокom і стоком  $U_C$  при різних значеннях напруги на затворі  $U_3$ . Ця залежність аналогічна анодній характеристиці підсилювальної лампи.

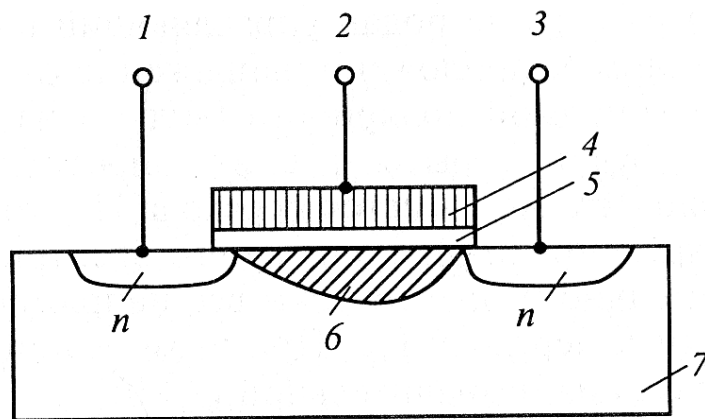
Сімейство характеристик польового транзистора із затвором у вигляді  $p-n$ -переходу зображене на мал. 3.



Мал. 3. Сімейство ВАХ польового транзистора із затвором у вигляді  $p-n$ -переходу

Спочатку зі збільшенням  $U_C$  струм  $I_C$  наростає практично лінійно. Потім настає режим насичення й збільшення  $U_C$  не приводить до росту струму. Це пояснюється тим, що при насиченні напруженість поздовжнього поля в каналі складається з напруженістю поперечного поля й канал в області стоку звужується. Причому чим більше напруженість поздовжнього поля (чим більше  $U_C$ ), тим більше звужується канал в області стоку. Струм при цьому залишається постійним. Струм насичення тем менше, чим більше напруга на затворі (зворотна напруга  $p-n$ -переходу).

Устрій польового транзистора з ізолюваним затвором схематично показаний на мал. 4. Основу приладу становить пластина напівпровідника  $p$ -типу. На невеликій відстані одна від одної в поверхню основної пластини вплавляють донорну домішку. Потім поверхню пластини кремнію піддають термічній обробці, у результаті чого на ній нарощується тонкий (0,1 мкм) шар діоксиду, що є гарним ізолятором. На шар ізолятора накладають металеву пластину затвору, що перекриває області донорної домішки  $n$ .



Мал. 4. Схематичне зображення польового транзистора з ізолюваним затвором: 1 - витік; 2 - затвор; 3 - стік; 4 - метал; 5 - діелектрик; 6 - канал  $n$ -типу; 7 - напівпровідник  $p$ -типу

Транзистори з ізолюваним затвором частіше називають транзисторами типу МДП (метал-діелектрик-напівпровідник). Спрощено принцип його роботи можна представити в такий спосіб. При відсутності напруги на затворі області  $n$  витоку й стоку розділені непровідним прошарком основної пластини. При подачі на затвор позитивної напруги електрони витягаються з основної пластини й накопичуються під ізолюючим прошарком. При певній різниці потенціалів концентрація електронів під діелектриком перевищить концентрацію дірок і області  $n$  будуть з'єднані провідним електронним каналом.

У розглянутому випадку провідний канал між витоком і стоком індукується напругою затвора. Різновидом МДП-транзисторів є конструкції, при яких канал вбудовується в процесі виготовлення приладу шляхом уведення відповідних домішок. Напруга затвора міняє концентрацію носіїв і провідність вбудованого каналу.

Польові транзистори можуть бути виготовлені й на основі пластин  $n$ -типу.

## 2. Тиристри.

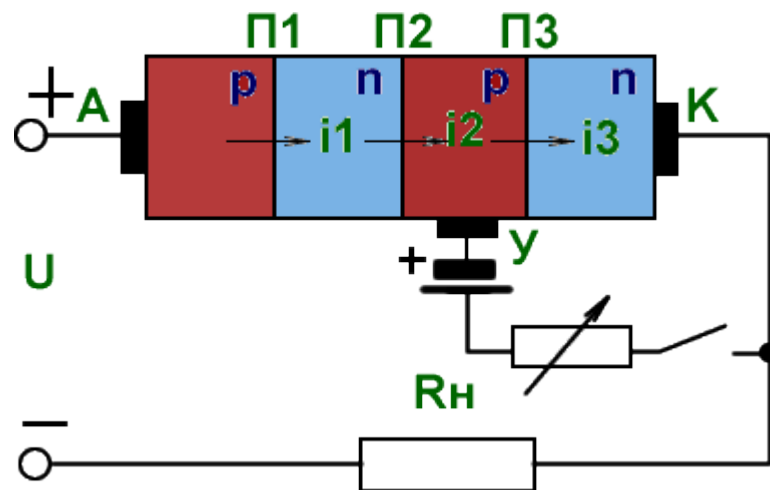
Чотиришаровий кремнієвий вентиль із двома електродами (анодом і катодом) називається **динистором**. Якщо крім анода й катода є третій (керуючий) електрод, то вентиль стає керованим і називається **тиристором**.

Тиристор, а також динистор мають чотири шари - p-p-n (мал. 5), між якими перебувають три p-n-переходи П1, П2, П3.

У тиристора від середньої області p є вивід - керуючий електрод У.

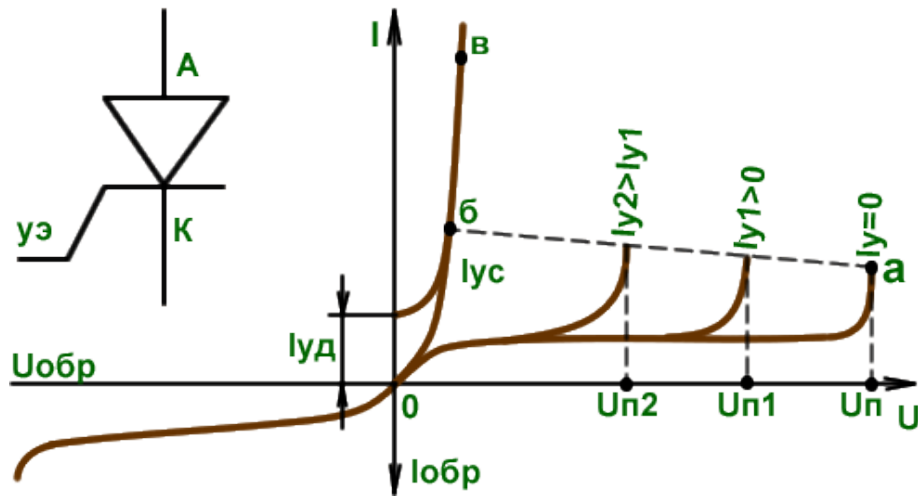
При відключеному керуючому електроді тиристор перетворюється в динистор.

Якщо між анодом і катодом вентиля прикладена невелика постійна напруга в прямому напрямку, то переходи П1 і П3 будуть відкритими і їх опір малий. Перехід П2 буде включений у зворотному (непровідному) напрямку і його опір великий, так що вся прикладена до тиристора напруга буде практично на переході П2, а струм у ланцюзі малий.



Мал. 5. Схема устрою тиристора.

При підвищенні напруги  $U$  на тиристорі струм у ланцюзі збільшується незначно, тому що обмежується великим опором переходу П2 і вольтамперна характеристика тиристора буде подібна зворотній гілці характеристики діода (крива **Оа** на мал. 6).



Мал. 6. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) тиристора і його умовна позначка.

Якщо напруга досягне деякого певного значення, називаного **напругою перемикання**  $U_{пер}$ , то в переході П2 напруженість електричного поля стає достатньою для іонізації й утвору нових вільних носіїв зарядів (електронів і дірок), його опір різко зменшується й тиристор відкривається.

Напруга на відкритому тиристорі (ділянка **бв** вольтамперної характеристики) мала (порядку 1/2 В) і майже незмінна, так що струм у ланцюзі обмежується опором зовнішнього навантаження.

Найбільший струм тиристора лімітується гранично припустимою потужністю, що розсіюється ним. Якщо зменшувати струм через відкритий тиристор, то він буде залишатися відкритим доти, поки струм у тиристорі достатній для підтримки процесу утвору носіїв зарядів у переході П2. При струмі, менше певного значення, називаного **струмом утримання**  $I_{уд}$ , тиристор закривається, тобто вертається в непровідний стан.

Якщо на керуючий електрод подати позитивний потенціал від стороннього джерела, то в переході П3 виникне струм керування й з'являться додаткові носії зарядів, внаслідок чого поменшає напруга перемикання цього переходу й тиристор відкривається при меншій напрузі  $U_{п1}$ .

Чим більше струм керування  $I_y$ , тим більше додаткових зарядів у переході П3 і менше напруга перемикання тиристора.

При певному значенні струму керування, називаному **струмом спрямління**  $I_{yc}$  тиристор буде працювати як некерований вентиль, тобто буде відкритий при будь-якій позитивній напрузі на його аноді.

Таким чином, тиристор відкривається як при подачі на його анод напруги перемикання, так і при включенні струму керування достатньої величини  $I_{yc}$ .



При подачі на затискачі тиристора зворотної напруги  $U_{обр}$  він буде закритий зворотно включеними переходами П1 і П3 незалежно від керуючого струму і його вольт-амперна характеристика практично не відрізняється від зворотної гілки вольтамперної характеристики некерованого вентиля (див. мал. б).

Тиристори мають два стійкі стани: при закритому тиристорі його опір дуже великий ( $R \rightarrow \infty$ ), при відкритому - малий ( $R \rightarrow 0$ ). Тому тиристори знаходять застосування як безконтактні перемикачі в інверторах, регульованих випрямлячах, у схемах захисту і т.д.

### Питання для самоконтролю

1. Чим конструкція польового транзистора з р-п переходом відрізняється від конструкції біполярного транзистора?
2. Намалюйте схематичне позначення польових транзисторів з р-п-переходом з р- і п- каналом і позначте їх виводи.
3. Чим відрізняється конструкція МОП-транзистора від конструкції польового транзистора з р-п-переходом?
4. Опишіть, як відбувається управління струмом у польовому МОП-транзисторі.
5. Намалюйте схематичне позначення польових МОП транзисторів з р- і п-каналом і позначте їх виводи.
6. Опишіть структуру тиристора.
7. Намалюйте вольт-амперну характеристику некерованого тиристора і опишіть його роботу.
8. Намалюйте сімейство вольт-амперних характеристик керованого тиристора і опишіть його роботу.
9. Для чого використовують тиристори?

### Список літератури

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – § 16.8 - 16.10 (с. 499 – 509).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §§11.4, 11.6 (с. 276 – 284, 289 – 300).

3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – глава 12, § 12.8, 12.9 (с. 344 – 355).

**Змістовий модуль 15. Фотоелектронні прилади**  
**Тема 15.1. Фотоефект. Фотоелементи із зовнішнім фотоефектом**

**Питання теми**

1. Загальні відомості про фотоелектронні прилади
2. Фотоелементи із зовнішнім фотоефектом

**1. Загальні відомості про фотоелектронні прилади**

**Фотоелектронними приладами** називають перетворювачі променистої енергії, завдяки якій змінюються електричні властивості речовини, що утворює даний прилад.

Ці прилади діляться на два типи: із зовнішнім і внутрішнім фотоефектом.

Суть **зовнішнього фотоефекта** полягає в тому, що при опроміненні фотокатода світлом виникає явище фотоелектронної емісії. При цьому струм фотоемісії прямо пропорційний світловому потоку (закон Столетова):

$$I_{\phi} = k\Phi$$

де  $I_{\phi}$  - струм фотоемісії, мкА;  $\Phi$  - світловий потік, лм;  $k$  - інтегральна чутливість фотокатода.

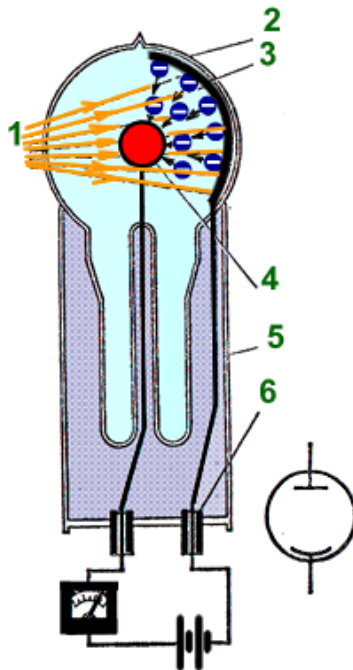
Інтегральна чутливість дорівнює значенню фотоструму, викликаного світловим потоком стандартного джерела білого світла в 1 лм.

Суть **внутрішнього фотоефекта** полягає в тому, що в напівпровіднику під дією світлової енергії виникають рухливі носії зарядів - пари електронів і дірок. При цьому енергія фотона йде на переміщення електрона з валентної зони в зону провідності й опір напівпровідника зменшується.

**2. Фотоелементи із зовнішнім фотоефектом**

У вакуумних або електронних фотоелементах рух відбувається у вакуумі, у газонаповнених або іонних фотоелементах електрони переміщуються в розрідженому газі й іонізують атоми газу.

Фотоелемент із зовнішнім фотоефектом (мал. 1) має скляну колбу 2, у якій створений вакуум (у вакуумному фотоелементі) або після відкачки повітря колба заповнена розрідженим газом (аргоном при низькому тиску - в іонних фотоелементах).



Мал. 1. Фотоелемент із зовнішнім фотоелементом.

Внутрішня поверхня колби, за винятком невеликого "вікна" для проходження світлового потоку 1, покрита фотокатодом 3, який являє собою шар срібла (подложка), на який нанесений напівпровідниковий шар окису цезію.

Анод 4 фотоелемента виготовляють у вигляді кільця, щоб він не перепиняв шлях світловому потоку до катода. Колба міститься в пластмасовому цоколі 5, у нижній частині якого перебувають контактні штырьки 6 з виводами від анода й катода.

Під дією прикладеної напруги  $U$  джерела живлення між анодом і катодом фотоелемента створюється електричне поле, і електрони, що вилітають із освітленої поверхні катода, направляються до позитивно зарядженого анода.

Таким чином, у ланцюзі встановиться фотострум  $I_{\phi}$ , залежність якого від світлового потоку  $\Phi$  при незмінній напрузі джерела живлення ( $I_{\phi} = f(\Phi)$ ) називається *світловою характеристикою*.

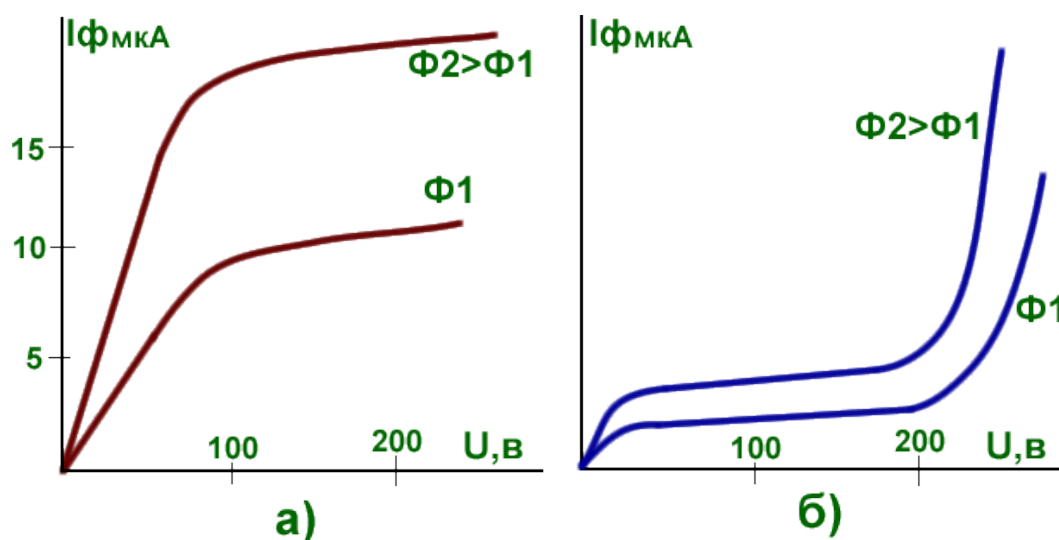
В іонному фотоелементі електрони іонізують атоми газу й збільшують потік електронів, тобто збільшують струм фотоелемента, підвищуючи його чутливість.

Фотоелектронна емісія й фотострум фотоелемента залежать від довжини хвилі світлового випромінювання, тому крім світлової чутливості фотоелементи характеризуються спектральною чутливістю.

*Анодні вольт-амперні характеристики* фотоелементів показують залежність фотоструму від прикладеної до затискачів фотоелемента напруги при незмінному світловому потоці, що освітлює фотокатод, тобто  $I_{\phi} = f(U)$  при  $\Phi = \text{const}$ .

В електронного фотоелемента фотострум спочатку швидко росте при збільшенні напруги, а потім ріст його вповільнюється й, нарешті, майже зовсім припиняється, тобто, настає режим насичення (мал. 2, а).

Для іонних фотоелементів анодна вольтамперная характеристика після горизонтальної ділянки (електронний струм) піднімається нагору внаслідок іонізації газу (мал. 2, б).



Мал. 2. Анодні вольт-амперні характеристики фотоелементів: а – електронного; б – іонного.

Електронні фотоелементи широко застосовуються в різних галузях науки й техніки. Зокрема, їх використовують у фотореле, які забезпечують контроль різних величин на виробництві: освітленості, прозорості середовищ, якості обробки поверхні деталей і т.п.

### Питання для самоконтролю

1. Поясніть суть зовнішнього та внутрішнього фотоефектів.
2. Що собою являють світлова і вольт-амперна характеристики фотоелементів?

### Література

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – §§ 17.1 – 17.2 (с. 510 – 514).
2. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. § 12.10 (с. 356 – 363).

**Змістовий модуль 15. Фотоелектронні прилади**  
**Тема 15.2. Фотоелементи із внутрішнім фотоелементом**

**Питання теми**

1. Фоторезистор
2. Фотодіод
3. Фототранзистор
4. Світлодіод

**1. Фоторезистор.**

Фотоелементи із внутрішнім фотоелементом називаються **фоторезисторами** (фотоопорами). Вони (мал. 1) являють собою напівпровідникові прилади, електричний опір яких різко змінюється під дією падаючого на них світлового випромінювання.

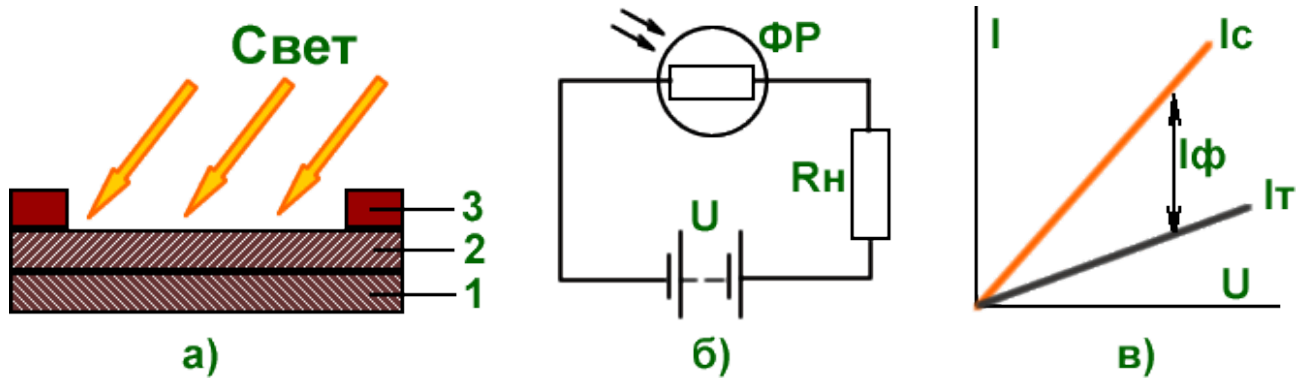


Мал. 1. Фоторезистори

У якості напівпровідників застосовують сірчистий свинець (фоторезистор ФСА), селенід кадмію (фоторезистор ФСД), сірчистий кадмій (фоторезистор ФСК).

Фоторезистори ФСА застосовуються в інфрачервоній, а інші - у видимій області світла. Чутливість фоторезисторів значно вище чутливості фотоелементів із зовнішнім фотоелементом, тому в низці обладнань фоторезистори заміняють раніше використовувані фотоелементи із зовнішнім фотоелементом.

Фоторезистор являє собою (мал. 2, а) скляну пластинку 1, на яку нанесений тонкий шар напівпровідника 2, покритий прозорим лаком для захисту від механічних ушкоджень і вологи. По краях виведено два металеві електроди 3. Фоторезистор поміщений у пластмасовий корпус із двома ніжками, до яких приєднуються електроди. Умовна позначка й схема включення фоторезистора показані на мал. 2, б.



Мал. 2. Фоторезистор: *а* – устрій; *б* – схема включення й умовне графічне позначення; *в* – вольт-амперна характеристика.

Фоторезистор працює тільки від зовнішнього джерела живлення й має однаковий опір в обох напрямках.

Неосвітлений фоторезистор має більший «темновий» опір  $R_T$  (від сотень кілоом до декількох мегаом) і через нього проходить малий «темновий» струм  $I_T$ .

При освітленому фоторезисторі його опір різкий зменшується й струм збільшується до деякого значення  $I_c$ , що залежить від інтенсивності освітлення. Різниця між струмами при освітленні й «темновим» називається фотострумом, тобто  $I_\phi = I_c - I_T$ .

Вольт-амперна характеристика фоторезистора (мал. 2, в), тобто залежність фотоструму від напруги джерела живлення при незмінному світловому потоці  $I_\phi = f(U)$  при  $\Phi = \text{const}$  лінійна. Видно, що пряма затіненого струму більш полого, ніж освітленого. Це говорить про меншу чутливість неосвітленого елемента.

До недоліків фоторезисторів належить їхня інерційність (при освітленні фотострум не відразу досягає свого кінцевого значення, а лише через якийсь час), нелінійність світлової характеристики (фотострум зростає повільніше, ніж сила світла), залежність електричного опору й фотоструму від температури навколишнього середовища.

Фоторезистори застосовуються при низьких інтенсивностях світла. Вони можуть витримувати високі робочі напруги до 200-300 В при малім споживанні потужності - до 300 мВт.

Фоторезистори використовуються для виміру інтенсивності світла у фотографічній устаткуванні, в охоронних датчиках, в обладнанні автоматичного відкривання дверей.

## 2. Фотодіод

Фотоелементи з фотоэффектом у замикаючому шарі, що називаються вентильними фотоелементами, мають замикаючий шар між напівпровідниками з  $p$ - і  $n$ -провідностями. У цих фотоелементах під впливом світлового випромінювання виникає ЕРС, називана фото-ерс.

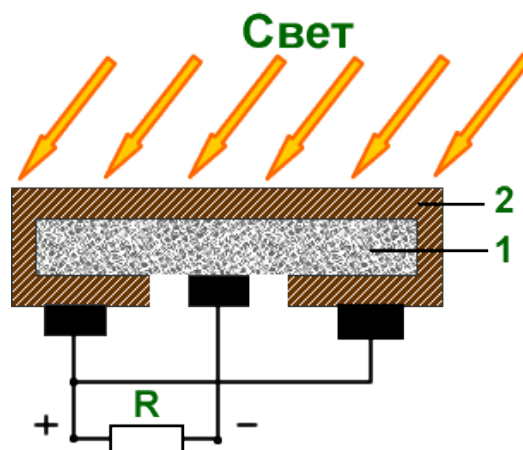
Для виготовлення вентильних фотоелементів застосовують селен, сірчистий таллій, сірчисте срібло, германій і кремній.

Освітлення поверхні фотоелемента поблизу  $p$ - $n$ -переходу викликає іонізацію атомів кристала й утвір нових пар вільних носіїв зарядів - електронів і дірок.

Під дією електричного поля  $p$ - $n$ -переходу електрони, що утворюються в результаті іонізації атомів кристала, переходять у шар  $n$ , а дірки - у шар  $p$ , що приводить до надлишку електронів у шарі  $n$  і дірок у шарі  $p$ .

Під дією різниці потенціалів (фото-ерс) між шарами  $p$  і  $n$  у зовнішньому ланцюзі проходить струм  $I$ , спрямований від електрода  $p$  до електрода  $n$ . Цей струм залежить від кількості носіїв зарядів - електронів і дірок, тобто від сили світла.

Чутливість вентильних фотоелементів висока (до 10 мА/лм), вони не вимагають джерела живлення й знаходять широке застосування в різних областях електроніки, автоматики, вимірювальної техніці і т.д. Принцип обладнання кремнієвого фотоелемента із замикаючим шаром показаний на мал. 3.



Мал. 3. Вентильний фотоелемент

На пластину кремнію  $1$  з домішкою, що створює електронну провідність, вводять домішку бору шляхом дифузії у вакуумі, у результаті цього утворюється шар напівпровідника з дірковою провідністю  $2$  дуже малої товщини, тому світлові промені вільно проникають у зону переходу.



Батареї кремнієвих елементів знаходять застосування для безпосереднього перетворення сонячної енергії в електричну. Такі перетворювачі, названі *сонячними батареями*, застосовують, наприклад, на штучних супутниках Землі для живлення їх апаратури.

Напівпровідниковий фотоелемент із двома електродами, розділеними *p-n*-переходом, називаний *фотодіодом*, може працювати як із зовнішнім джерелом живлення (перетворювальний режим), так і без зовнішнього джерела (генераторний режим).

При роботі в генераторному режимі фотодіода його освітлення викликає виникнення фото-ерс, під дією якої в зовнішньому ланцюзі через навантаження проходить струм, тобто джерелом живлення є фотодіод.

При роботі у фотоперетворювальному режимі напруга зовнішнього джерела живлення прикладена зустрічно фото-ерс і фотодіод подібний фоторезистору з більш високою чутливістю.

Якщо фотодіод не освітлений, то через нього проходить невеликий зворотний струм (темновий струм) під дією зовнішнього джерела живлення. При освітленні електронної області фотодіода утворюються носії зарядів - електрони й дірки. Дірки доходять до *p-n*-переходу й під дією електричного поля переходять у *p*-область, тобто освітлення викликає збільшення числа неосновних носіїв, що перейшли з *n*-області в *p*-область, і, отже, струм у ланцюзі зростає (виникає фотострум).

### 3. Фототранзистор

*Фототранзистор (мал. 4) являє собою тришаровий напівпровідниковий прилад із двома p-n-переходами, що володіє властивістю посилення фотоструму при впливі променевої енергії.*



Мал. 4. Фототранзистори

Фототранзистор, як правило, виконаний у вигляді звичайного площинного транзистора з германія або кремнію. Світловий потік падає на базу, тому емітер роблять тонким, невеликих розмірів.

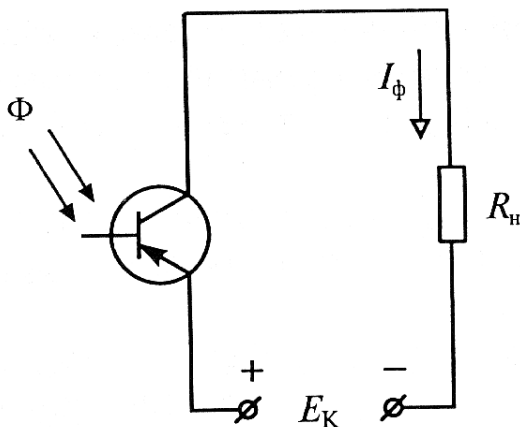
На мал. 5 представлена двополюсна схема включенні фототранзистора структури  $p-n-p$ .

Під дією світла в області бази утворюються пари носіїв зарядів - електрони й дірки.

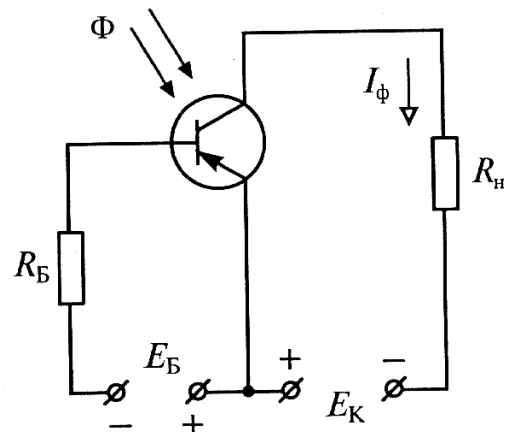
Дірки (неосновні носії бази) під дією електричного поля джерела  $E_K$  рухаються через колекторний перехід, утворюючи фотострум  $I_\Phi$ , що проходить через навантаження  $R_H$ . Електрони, що не пройшли через емітерний перехід, і залишилися в базі, знижують потенційний бар'єр.

Це полегшує перехід дірок з емітера в базу, збільшуючи колекторний фотострум. Чутливість фототранзистора сильно перевищує чутливість фотодіодів і має значення порядку 0,5-1 А/лм.

На мал. 6 показана схема з підключеною базою. Можливості такої схеми ширше, тому що на її вхід можна подавати крім світлового електричний сигнал. Звичайно електричний вхід використовують для вибору робочої точки на лінійній ділянці характеристики, а також для зменшення зовнішніх впливів.



Мал. 5. Двополюсна схема включення фототранзистора з відключеною базою



Мал. 6. Схема включення фототранзистора з підключеною базою

Фототранзистори широко застосовуються в різних областях: фототелеграфії, фототелефонії, в обчислювальній техніці, реєстрації видимого, інфрачервоного й ультрафіолетового випромінювання.

#### 4. Світлодіод

Напівпровідниковий діод, що випромінює світло (світлодіод, мал. 7) - це найпоширеніше напівпровідникове світловипромінювальне обладнання.

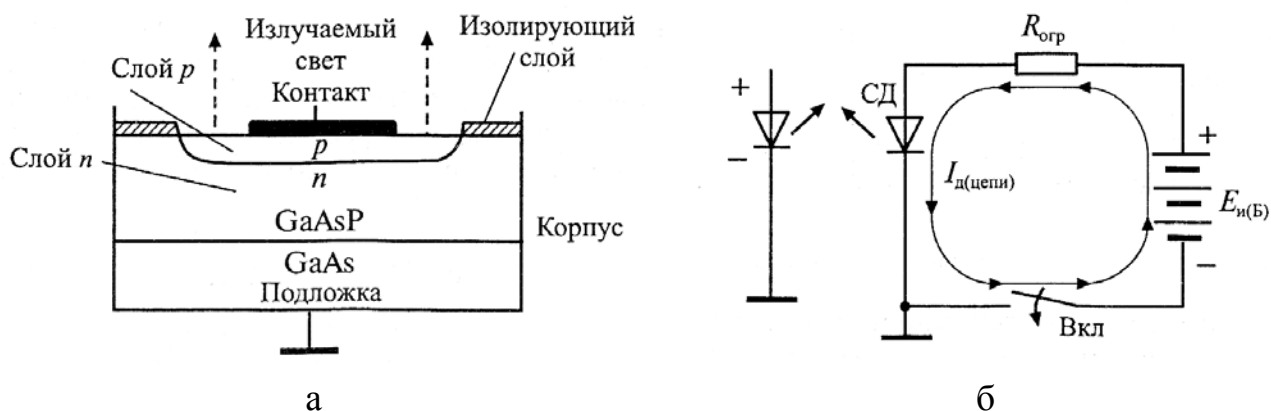
Кожний  $p-n$ - перехід може випромінювати світло, коли через немає протікає струм.



Мал. 7. Зовнішній вигляд світлодіодів

Світло виникає, коли вільні електрони рекомбінують із дірками й «зайва» енергія звільняється у вигляді кванта енергії, тобто світла.

На мал. 7 показане обладнання світлодіода (а) і схема його включення (б), де  $R_{ОБМ}$  - для обмеження прямого струму й напруги, щоб не вивести світлодіод з ладу;  $GaAs$  - арсенід галію випромінює світло в інфрачервоному діапазоні, яким не сприймається людським оком;  $GaAsP$ - арсенід-фосфат галію випромінює видиме червоне світло; змінюючи вміст фосфору, можна отримати світлодіоди, що випромінюють кванти світла різної частоти (кольору); шар  $p$  робиться тонкішим і слабкіше легованим, ніж шар  $n$ , щоб не перешкоджав проходженню променя, народжуваного в  $p-n$ -переході.



Мал. 7. Обладнання світлового діода (а); схема включення (б)

Світлодіод постачений лінзою, яка збирає світло й збільшує його інтенсивність. Для нормальної роботи світлодіода на нього повинне бути подане пряме зміщення (напруга) близько 1,2 В.

### Питання для самоконтролю

1. Поясніть принцип роботи фоторезистора. Наведіть його умовне графічне позначення.
2. Поясніть принцип роботи фотодіода. Наведіть його умовне графічне позначення. Назвіть режими роботи.
3. Поясніть принцип роботи фототранзистора. Наведіть його умовне графічне позначення. Назвіть режими роботи.
4. Поясніть принцип роботи світлодіода. Наведіть його умовне графічне позначення. Від чого залежить довжина хвилі випромінення?

### **Література**

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – §§ 17.4 – 17.6 (с. 517 – 524).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – § 11.7 (с. 301 – 309).
3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. § 12.10 (с. 356 – 363).

**Змістовий модуль 16. Електронні випрямлячі.  
Лекція № 18. Тема № 14. Електронні випрямлячі.**

**План лекції**

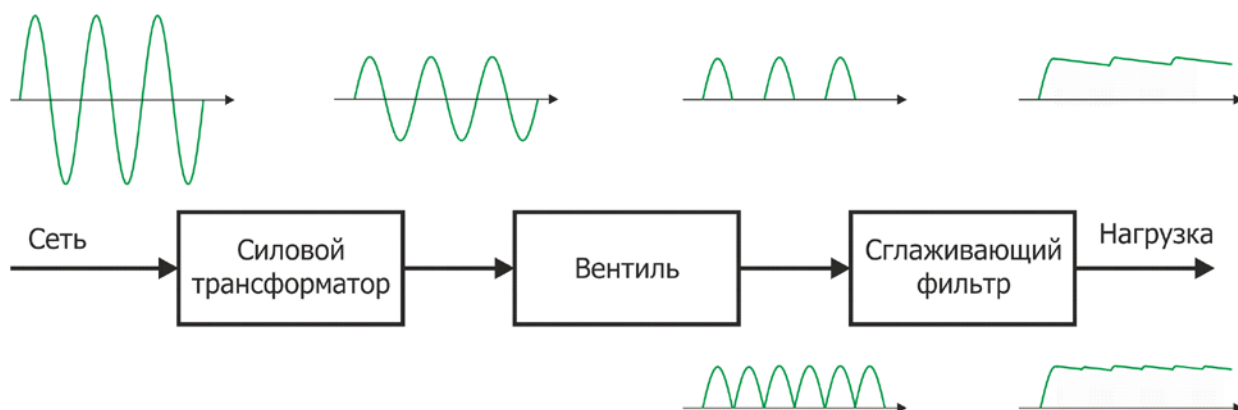
1. Призначення й устрій випрямлячів
2. Однопівперіодний випрямляч
3. Двопівперіодний випрямляч
4. Трифазна схема випрямлення
5. Фільтри, що згладжують
6. Стабілізатори напруги

**1. Призначення й устрій випрямлячів**

Випрямлячі – це пристрої, що служать для перетворення змінного струму в постійний.

На мал. 1 представлена структурна схема випрямляча, до складу якого входять:

- силовий трансформатор, що служать для перетворення (звичайно зниження) змінної живлячої напруги;
- вентиль, що володіє однобічною провідністю, що забезпечує перетворення змінного струму у випрямлений (струм одного напрямку);
- фільтр, що згладжує, який служать для перетворення випрямленого струму в струм, близький за формою до постійного.



Мал. 1. Структурна схема випрямляча з осцилограмами напруг

Для перетворення змінного струму в постійний служать електричні вентилі різних типів: електронні (кенотрони), напівпровідникові (германієві, кремнієві й ін.), іонні (газотрони, тиратрони й ін.).

Напівпровідниковий вентиль (діод) характеризується головним чином середнім припустимим значенням випрямленого струму й амплітудою зворотної напруги.

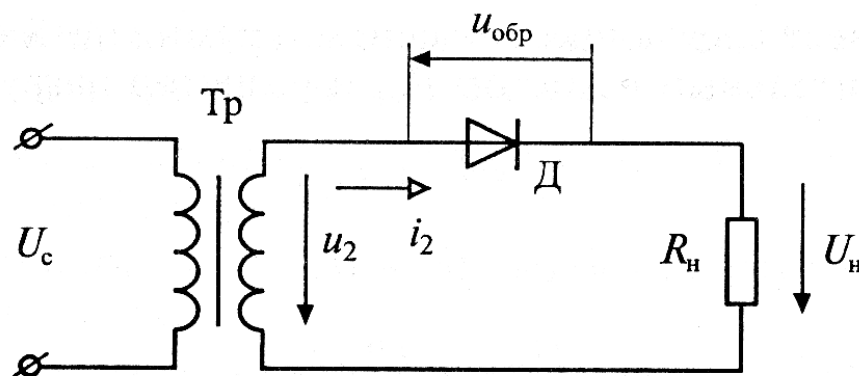
*Середнє значення струму* визначає тепловий режим вентиля, так що підвищення середнього значення струму поведе до перегріву вентиля.

*Амплітуда зворотної напруги* - це та найбільша напруга, яка може бути прикладена до вентиля у зворотному (непровідному) напрямку, не піддаючи його небезпеці пробою.

У випрямлячах вентиля з'єднують по певних схемах.

## 2. Однопівперіодний випрямляч

На мал. 2 представлена схема однопівперіодного випрямляча.



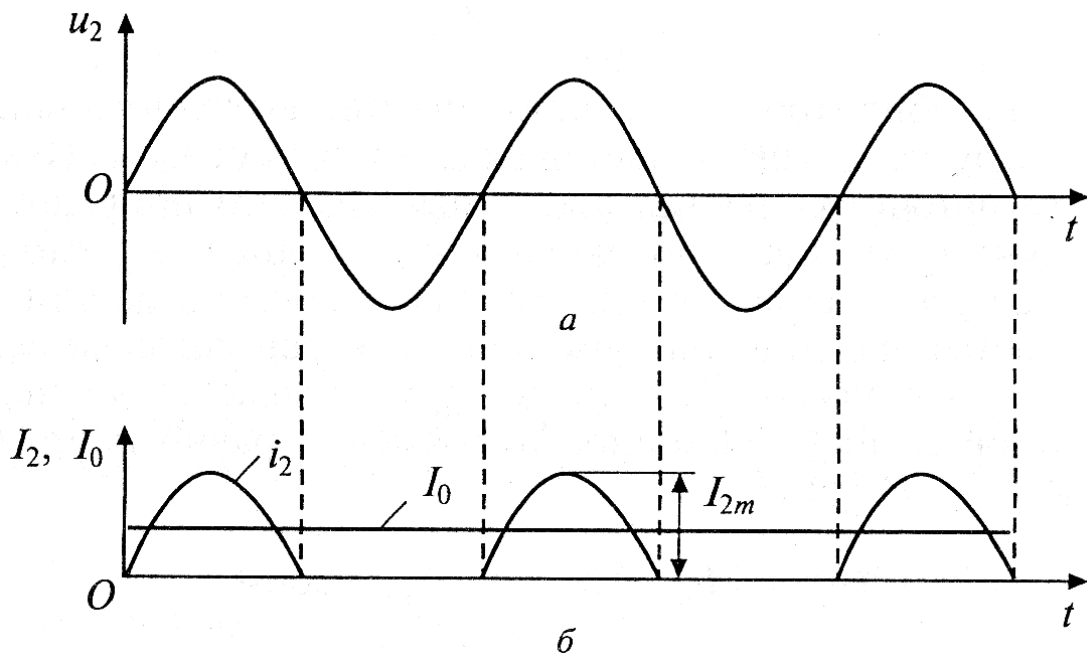
Мал. 2. Схема однопівперіодного випрямляча

Змінну синусоїдальну напругу  $u_2$  (мал. 3, а) подають на діод Д. За рахунок односторонньої провідності діодів струм  $i_2$  (мал. 3, б) проходить тільки в позитивні півперіоди напруги  $u_2$  й, отже, має імпульсну форму. Постійна складова цього струму  $I_0$  визначається середнім значенням струму  $i_2$ , що проходить через навантаження  $R_H$  за півперіод.

Середнім значенням струму  $I_0$  називається середнє арифметичне значення із усіх миттєвих значень  $i_2$  за півперіод:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_2 dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{2m} \sin \omega t dt = -\frac{I_{2m}}{\omega T} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \Big|_0^{T/2} = -\frac{I_{2m} T}{2\pi T} \cdot (\cos \pi - \cos 0) = \frac{I_{2m}}{\pi}$$

$$I_0 = 0,318 I_{2m} = 0,45 I_2. \quad (1)$$



Мал. 3. Напряга на затискачах вторинної обмотки трансформатора (а), випрямлений струм  $i_2$ , постійна складова струму  $I_0$  (б)

Постійна складова випрямленої напруги на  $R_H$  визначається законом Ома:

$$U_0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H.$$

Знайдемо співвідношення між  $U_0$  і діючим значенням напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора  $U_2$ . Тому що  $R_H \gg R_{\text{прд}}$  ( $R_{\text{прд}}$  - прямий опір діода), то  $I_{2m} R_H \approx U_{2m}$ . Отже,

$$U_0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H \approx \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} = 0,45 U_2. \quad (2)$$

Значення  $U_0$  задають при розрахунках випрямляча, визначають  $U_2$ , і за відомим значенням напруги мережі  $U_C$  визначають коефіцієнт трансформації  $k = \frac{U_C}{U_2}$ .

Раніше було встановлено, що напівпровідникові діоди характеризуються припустимою зворотною напругою  $U_{\text{обрд}}$ .

Під час негативного півперіоду напруги  $u_2$  діод Д перебуває під дією зворотної напруги, максимум якого рівний  $U_{2m}$ .

Тому що  $R_{ОБРД} \gg R_H$ , то

$$U_{ОБРм} = U_{2m} = \pi U_0 = 3,14U_0. \quad (3)$$

Звідси випливає, що при виборі діода для роботи в схемі однопівперіодного випрямлення треба дотримувати нерівності  $U_{ОБРД} > 3,14U_0$ . Якщо такий діод підібрати не вдається, прибігають до послідовного включення декількох діодів.

Середнє значення струму, що проходить через діод, не повинне перевищувати  $I_{СРД}$ . Для однопівперіодного випрямляча

$$I_{СРД} = I_0 = \frac{I_m}{\pi}. \quad (4)$$

Якщо остання нерівність не виконується для діодів наявних типів, необхідно виключити кілька діодів паралельно.

Однопівперіодна схема рідко використовується в сучасних випрямлячах, тому що вторинна обмотка трансформатора працює тільки половину періоду, і тому габаритна потужність трансформатора повинна перевищувати потужність випрямленого струму приблизно в 3 рази. Зворотна напруга на діоді більш ніж в 3 рази перевищує випрямлену напругу на навантаженні, що накладає обмеження на застосовувані діоди. Випрямлена напруга має дуже високий рівень пульсацій, що утрудняє його згладжування.

### 3. Двонапівперіодний випрямляч

Найбільш широке поширення одержала мостова схема двонапівперіодного випрямляча (мал. 4).

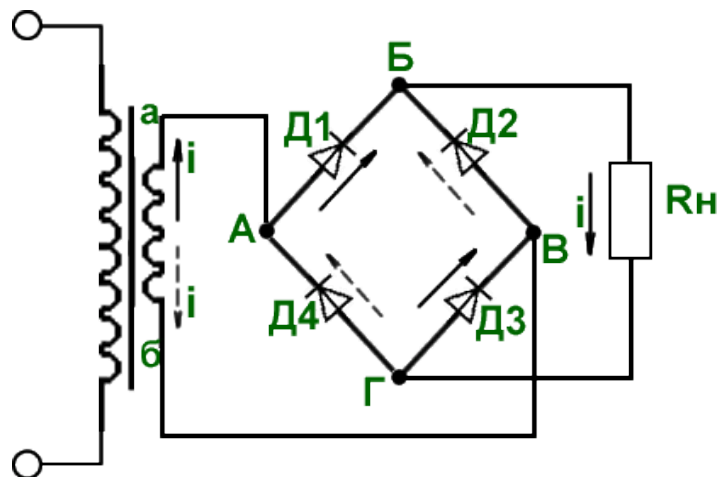
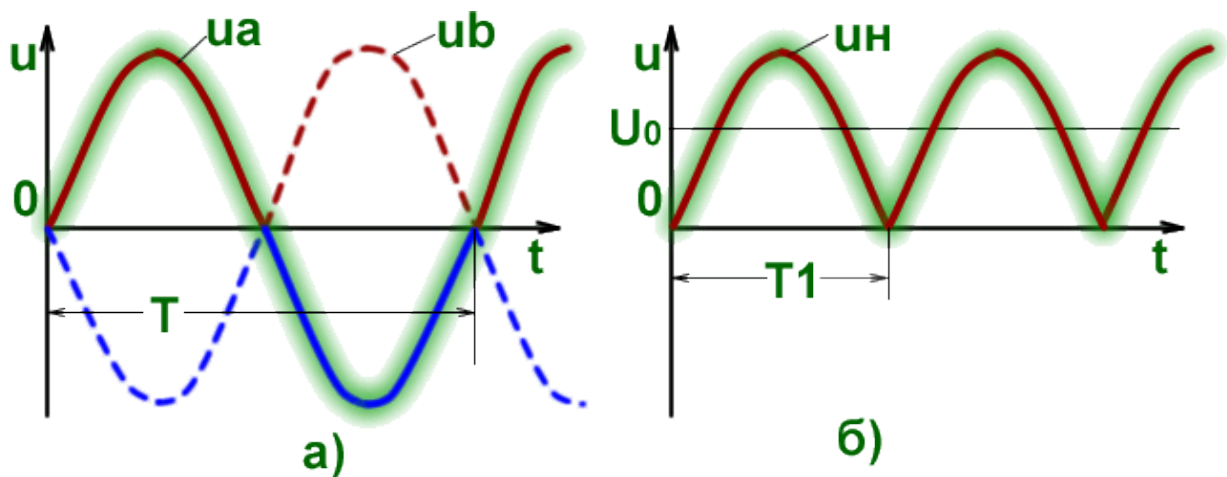


Рис. 4. Мостова схема двонапівперіодного випрямляча



Схема складається з силового трансформатора й чотирьох діодів Д1 – Д4. До діагоналі моста А-В підключена вторинна обмотка трансформатора, до діагоналі Б-Г - опір навантаження  $R_H$ .

У позитивний півперіод напруги  $u_2$ , коли потенціал точки А вище потенціалу точки В (див. мал. 4, 5, а), відкриті діоди Д1 і Д3 і струм проходить по ланцюгу: точка А, діод Д1, опір навантаження  $R_H$  (зверху вниз за схемою), діод Д3, точка В. У негативний півперіод напруги відкриті діоди Д2 і Д4 і тепер струм проходить по ланцюгу: точка В, діод Д2, опір навантаження  $R_H$  (зверху вниз за схемою), діод Д4, точка А. Через опір навантаження  $R_H$  струм проходить увесь час у незмінному напрямку. Таким чином, струм в навантаженні має форму, показану на мал. 5, б, що й відповідає двонапівперіодному випрямленню.



Мал. 5. Криві напруг у двонапівперіодній схемі випрямлення:  
а - у фазах вторинної обмотки, б - на навантаженні

Кожний діод тут працює як в однополуперіодній схемі. Струми діодів складаються, тому постійна складові струму

$$I_0 = \frac{2I_{2m}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}I_2}{\pi} = 0,90I_2. \quad (5)$$

Зрівнявши це значення струму із  $I_0$  для однопівперіодного випрямляча, доходимо висновку, що в даній схемі набагато краще використовуються обмотки трансформатора по струму. Це дозволяє значно зменшити габарити трансформатора.

Знайдемо тепер співвідношення між  $U_0$  і  $U_2$ . Тому що постійна складова напруги  $U_0 = I_0 R_H$ , то з урахуванням  $R_H \gg R_{\text{прД}}$  і  $I_2 R_H = U_2$ ,

$$U_0 = I_0 R_H = 0,90 I_2 R_H = 0,90 U_2. \quad (6)$$

Зворотна напруга, що діє на кожний діод у даній схемі така ж, як у схемі однопівперіодного випрямляча. Дійсно, коли діоди Д1 і Д3 відкриті, до діода Д2 прикладена повна зворотна напруга вторинної обмотки через відкритий діод Д1. Точно така ж зворотна напруга прикладена й до діода Д4. Отже,

$$U_{\text{обрм}} = U_{2m} = \sqrt{2} U_2 = \frac{\sqrt{2} U_0}{0,90} = 1,57 U_0. \quad (7)$$

Інакше кажучи, вимоги до одному діоду по припустимій зворотній напрузі в 2 рази менші, у порівнянні з однопівперіодною схемою.

Мале значення рівня пульсацій також є перевагою даної схеми.

#### 4. Трифазна схема випрямлення

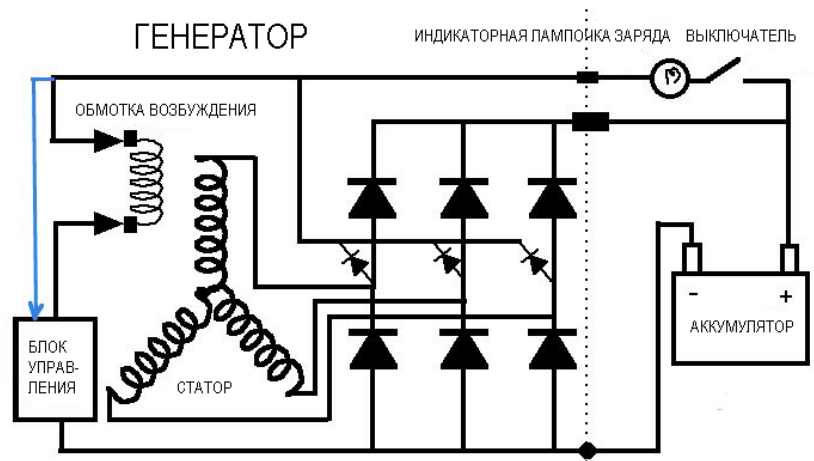
Мостова трифазна схема випрямлення змінного струму (на прикладі автомобільного генератора, мал. 6) зображена на мал. 7. У ній сполучаються принципи мостової схеми й схеми багатофазного випрямлення. У цій схемі первинні й вторинні обмотки можуть бути з'єднані як зіркою, так і трикутником.

Шість діодів утворюють дві групи – верхню по схемі мал. 7 і нижню. У верхньої групи катоди з'єднані разом і служать точкою виводу випрямляча з позитивним потенціалом, а в нижньої групи аноди з'єднані разом і служать точкою виводу з негативним потенціалом («0»).

При роботі цієї схеми випрямлюються обидві півхвилі змінних напруг усіх вторинних обмоток трансформатора, завдяки чому пульсації випрямленої напруги значно зменшуються.



Мал. 6. Автомобільний генератор



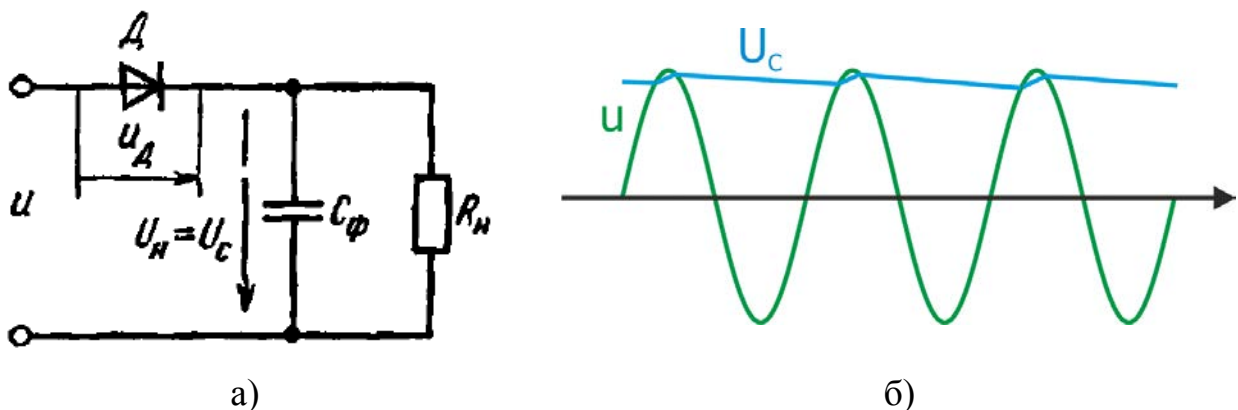
Мал. 7. Схема включення генератора

### 5. Фільтри, що згладжують

Для живлення низки вузлів електронної апаратури звичайно потрібна постійна напруга. Напруга ж, одержувана на виході розглянутих випрямних схем, є або пульсуючою (трифазний випрямляч), або імпульсною (одно- і двонапівперіодний випрямляч). Для того щоб випрямлена напруга мала необхідну форму, застосовують **фільтри, що згладжують**.

Фільтри, що згладжують, підрозділяються на ємнісні, індуктивні, індуктивно-ємнісні.

Найбільш простим є ємнісний фільтр, який складається з конденсатора  $C_\phi$ , включеного паралельно з навантаженням (мал. 8, а). Робота фільтра заснована на здатності конденсатора швидко запасати електричну енергію, а потім відносно повільно віддавати її в навантаження.



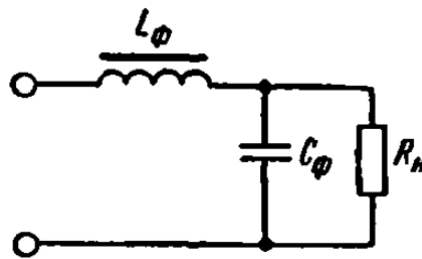
Мал. 8. Схема ємнісного фільтра (а) і графіки напруг у ньому (б)

Коли напруга на діоді  $D$ , рівна різниці напруги джерела й напруги на конденсаторі, позитивна, тобто  $U_d = u - U_c > 0$ , то діод відкритий і  $C_\phi$  заряджається. Тому що опір діода  $D$  досить малий, конденсатор устигає

зарядитися майже до  $U_m$ . Потім, коли  $U_d = u - U_c < 0$ , діод замкнений і конденсатор повільно розряджається через  $R_H$  доти, поки напруга джерела  $u$  знову не стане більше  $U_c$ . Час розрядки залежить від постійної часу  $\tau = C_\phi R_\phi$ , яка показує, протягом якого часу напруга на конденсаторі поменшає в 2,72 рази.

Ємнісні фільтри, як правило, використовують у випрямлячах малої потужності.

У випрямлячах з більшими струмами застосовують індуктивні й комбіновані фільтри. Ці фільтри забезпечують гарне згладжування струму в навантаженні. Їхню роботу (мал. 9) зручно пояснювати, представляючи напругу на вході фільтра як суму постійної складової й цілого ряду гармонік (змінних складових). Тоді індуктивність і ємність фільтра являють собою дільник. На індуктивному опорі дільника ( $X_L = 2\pi fL$ ) виділяється більша частина змінної, а на ємнісному ( $X_C = 1/2\pi fC$ ) - більша частина постійної складової напруги випрямляча.



Мал. 9. Комбінований LC-фільтр

## 6. Стабілізатори напруги.

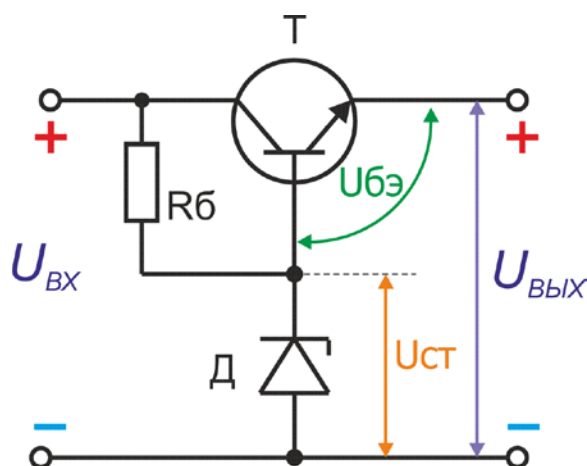
Обладнання, що підтримує автоматично постійну напругу на навантаженні при зміні дестабілізуючих факторів у певних межах, називається **стабілізатором напруги**. Такими дестабілізуючими факторами є вхідна напруга й опір навантаження, які змінюються в процесі роботи обладнання.

Існує два методи стабілізації напруги: *параметричний* і *компенсаційний*.

У параметричних стабілізаторах використовуються елементи з нелінійною вольт-амперною характеристикою (стабілітрони).

Компенсаційні стабілізатори мають більш оптимальні параметри. Робота таких стабілізаторів заснована на порівнянні вхідної напруги із заданим стабільним. Залежно від різниці між стабільним і вихідним напругами (неузгодженістю) здійснюється автоматичний вплив (регулювання), спрямоване

на зменшення цієї неузгодженості. Як приклад розглянемо схему стабілізатора, наведену на мал. 10.



Мал.10. Схема компенсаційного стабілізатора напруги

Стабільна (опорна) напруга  $U_{CT}$  створюється на кремнієвому стабілітроні Д. Транзистор Т відіграє роль елемента, що порівнює й регулює. Між базою й емітером діє невелика позитивна напруга  $U_{BE} = U_{CT} - U_{ВИХ}$ .

Таким чином,  $U_{ВИХ} \approx U_{CT}$ . Уявимо собі, що напруга на виході  $U_{ВИХ}$  трохи зросла. Отже, напруга  $U_{BE} = U_{CT} - U_{ВИХ}$  поменшає й транзистор почне закриватися (поменшає вихідний струм емітера). Ця обставина приведе до зменшення вихідної напруги практично майже до колишнього значення. Надлишок напруги впаде на транзисторі.

Найважливішим параметром, що характеризують роботу схеми стабілізатора, є коефіцієнт стабілізації, що представляє собою відношення відносної зміни вхідної напруги до відносної зміни вихідної напруги (при  $R_H = \text{const}$ ):

$$k_{CTU} = \frac{\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ}}{\Delta U_{ВИХ} / U_{ВИХ}}$$

де  $U_{ВХ}$  й  $U_{ВИХ}$  - номінальні значення вхідного й вихідного напруг.

### Питання для самоконтролю

1. Намалюйте схему однопівперіодного випрямляча й поясніть його роботу.
2. Які недоліки однопівперіодного випрямляча?

3. Намалюйте мостову схему двонапівперіодного випрямляча й поясніть його роботу.
4. Які достоїнства мостової схеми двонапівперіодного випрямляча?
5. Намалюйте схему трифазного випрямляча й поясніть її роботу.
6. Яке призначення фільтра, що згладжує?
7. Поясніть принцип роботи фільтра, що згладжує.
8. Для чого служить стабілізатор напруги?

### **Список літератури**

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – глава 18, §§ 18.1 – 18.6 (с. 525 – 540).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §§12.1 – 12.3 (с. 319 – 340).