

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Відокремлений структурний підрозділ  
«Любешівський технічний фаховий коледж  
Луцького національного технічного університету»  
Циклова методична комісія викладачів  
математичних та природничо-наукових дисциплін



# **Електротехніка і автоматика**

**Конспект лекцій**

**для здобувачів освіти освітньо-професійного ступеня фаховий  
молодший бакалавр**

**Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування**

Любешів 2023

## Лекція № 1

Тема: *Основні задачі і напрямки електротехніки. Основні історичні моменти. Три напрямки розвитку галузі.*

### План

1. Електромагнітні явища – основа різних напрямків науки і техніки.
2. Области використання електроенергії.
3. Три основні напрямки електротехнічної галузі.
4. Коротко про розвиток електротехніки.
5. Основні моменти розвитку електроніки.
6. Мікроелектроніка – один з напрямків розвитку електроніки.
7. Електромагнітна теорія – об'єктивна і відносна.
8. Загальний план курсу "Основи електротехніки і електроніки".

Магнітні та електричні явища лежать в основі різних напрямів науки та техніки. Вони є основою і електротехніки. А також електроніки та радіоелектроніки. В електроніці та радіоелектроніці вирішується широке коло задач, пов'язаних з використанням електромагнітних явищ для передачі та обробки інформації (це зв'язок, вимірювання, керування, автоматизація технологічних процесів). І неможливо правильно сконструювати, модернізувати або просто відремонтувати будь-який прилад, що використовує електричну енергію, без уміння якісно і кількісно аналізувати його роботу в різних режимах і проводити необхідні обчислення, без навичок використання електричних і магнітних величин.

Функціонування сучасного суспільства без електричної енергії фактично стало неможливим. Це впливає хоча б з переліку основних напрямків її використання: побут, реклама, інформаційні технології, зв'язок, електричні технології (виписка сталей, електрозварювання, електроліз і т. п.), електротранспорт, силовий електропривод, що перетворює електричну енергію в механічну. Немає жодної галузі господарювання, жодної науково-дослідної роботи технічного спрямування, де б в той чи інший спосіб не була використана електротехніка. Тому знайомство з електротехнікою як наукою про практичне застосування електричних та магнітних явищ природи та законів, що їх описують, стає нагальною потребою для будь-якого технічного спеціаліста.

На сучасному етапі можна виділити **три основні напрямки електротехнічної галузі: електротехніка, електроніка, мікропроцесорна техніка.** Розвиток електротехніки практично почався після створення італійцем Алессандро Вольта у 1800 році хімічного джерела електричної енергії – електричної батареї. Наявність такого джерела відносно малої потужності дала можливість провести цілу низку наукових досліджень і відкрити фундаментальні правила та закони, що склали теоретичний фундамент

електротехніки. Помітним практичним наслідком цих досліджень стало широке застосування у першій половині XIX сторіччя дротяного електричного телеграфу, найбільш вдалий варіант якого розробив американець Семюель Морзе. Створення наприкінці XIX сторіччя електричних машин постійного та змінного струму дозволило перетворювати механічну енергію в електричну, передавати її на велику відстань та знову перетворювати електричну енергію в механічну та інші види енергії в потрібному місті і в потрібній кількості. Широкого розповсюдження набули електричне освітлення та електропривод різноманітних виробничих машин з релейно-контакторним керуванням. Згодом електричну енергію почали використовувати для виготовлення високоякісної сталі в електросталеплавильних печах, для електрозварювання металевих конструкцій. Для забезпечення всіх цих споживачів електричною енергією були створені потужні електричні станції та мереж. Елементною базою таких електротехнічних пристроїв є електромагнітні та електромеханічні перетворювачі, складовими яких є обмотки з міді або алюмінію та магнітопроводи з феромагнітних матеріалів, призначені для створення магнітних полів потрібної конфігурації та інтенсивності. В таких класичних електротехнічних пристроях використовуються явища електромагнітної індукції, взаємодії провідника із струмом з магнітним полем, взаємодії провідників із струмом між собою, електромагніти.

Одночасно розвиток електротехніки дав поштовх для виникнення спорідненої галузі – **електроніки**, яка займається вивченням та застосуванням фізичних явищ в електровакуумних та напівпровідникових приладах, характеристик та параметрів цих приладів, властивостей пристроїв та систем, заснованих на використанні цих приладів.

Можна вважати, що електроніку започаткували досліди Генріха Герца у 1688 р., які встановили наявність електромагнітного зв'язку між двома віддаленими один від одного коливними контурами. На питання "Яке значення будуть мати ваші досліди для практики?" Г. Герц якось відповів: "Ніякого". Але сталося зовсім інакше. Вже у травні 1895 р. російський винахідник О. С. Попов на засіданні російського фізико-хімічного товариства у С.-Петербурзі продемонстрував пристрій для реєстрації природних електромагнітних хвиль, створених блискавками. У березні 1896 р. він же передав на відстань біля 250 м першу бездротову телеграму з двох слів: "Генріх Герц".

У червні 1896 р. італійський інженер і підприємець Г. Марконі отримав перший патент з бездротової телеграфії і заснував компанію, яка багато зробила для широкого впровадження радіотелеграфії і передачі інформації на великі відстані. Почалися роботи по створенню потужних генераторів радіохвилі У 1904 р. в США було створено перший електровакуумний діод, а у 1907 р. –

тріод, принцип роботи яких був заснований на явищі електронної емісії, відкритого Т. Едісоном.

В наступні роки швидко розвішається радіотелеграф, радіозв'язок, виникає радіомовлення. Під час другої світової війни було створено радіолокатори, які відіграли величезну роль у боротьбі, наприклад, з германськими підводними човнами, які полювали на транспорт союзників. Радіолокатори використовували також: і для виявлення та винищення ворожих літаків. Електроніка забезпечила появу точних і чутливих вимірювальних приладів, електроніка надала можливість створити точну зброю.

Електроніка дозволила проводити обчислення, які раніше були недосяжні для вчених і змушували їх вести дослідження на спрощених моделях об'єктів: у 1946 р. у США було створено першу електронно-цифрову обчислювальну машину (ЕЦОМ), яка містила біля 18 000 ламп. Таким чином електроніка перестала бути лише радіоелектронікою і знайшла широке застосування у техніці та промисловості. Галузь технічної електроніки, яка займається застосуванням електровакуумних і напівпровідникових приладів та створених на їх основі систем в промисловості, називають **промисловою електронікою**.

Основні напрямки промислової електроніки: інформаційна електроніка, до якої можна віднести обчислювальну та інформаційно-вимірювальну техніку; енергетична електроніка (потужні електровакуумні та напівпровідникові перетворювачі електричної енергії); електронна технологія (застосування електронних та іонних пучків, височастотний нагрів і плавка, ультразвукове різання та зварювання).

З виникненням ЕЦОМ складність електронних пристроїв стала швидко зростати, а традиційна елементна база – електровакуумні лампи – не могли вже забезпечити їх надійність. Тимчасовий вихід з положення дало застосування напівпровідникових приладів – транзисторів, які за своїми функціональними можливостями могли замінити електровакуумні лампи. Поруч з транзисторами було розроблено багато інших напівпровідникових приладів (діодів, тиристорів). Застосування напівпровідникових приладів у електроніці, обчислювальній техніці, автоматичній, енергетичній набуло масового характеру, оскільки вони мали ряд суттєвих переваг перед електровакуумними приладами: високий коефіцієнт корисної дії, довговічність, надійність, порівняно малі габарити та масу.

Подальший прогрес було забезпечено завдяки бурхливому розвитку у 1970 – 1980 роках мікроелектроніки на ґрунті об'єднання досягнень електроніки та інтегральної технології. Електронні пристрої, виготовлені з використанням інтегральних мікросхем, започаткували розвиток нової галузі електроніки – **мікроелектроніки**. На базі досягнень мікроелектроніки створені потужні швидкодіючі малогабаритні ЕЦОМ та мікропроцесорні системи. Сучасна

обчислювальна техніка широко використовується не тільки для зберігання та обробки інформації, але й для керування технічними об'єктами за заданою програмою. Застосування мікропроцесорів дозволяє в багатьох випадках зменшити габарити виробів та споживання ними електричної енергії, поліпшити їх функціональні можливості. Основною перевагою мікропроцесорних систем є можливість зміни їх функцій шляхом лише зміни керуючої програми, що пояснює їх широке використання для автоматизації сучасного виробництва.

При вивченні теорії електромагнітних процесів треба брати до уваги:

по-перше, що ця теорія є об'єктивною, тобто її використання дозволяє (при певних умовах) правильно розуміти роботу електромагнітних пристроїв і експлуатувати їх;

по-друге, що окремі закони електромагнетизму відносні і діють лише в певній області, при певних умовах і обмеженнях, і це треба враховувати при їх використанні.

У загальному випадку електромагнітні явища описуються методами теорії електромагнітного поля. Вони універсальні, хоча і досить складні. Ми будемо розглядати менш універсальний, спрощений варіант дослідження процесів електромагнітних пристроїв.

Курс "*Основи електротехніки і електроніки*" являє собою вивчення основних закономірностей і параметрів електричних кіл, устрій та принцип дії деяких основних електротехнічних та електронних пристроїв і базових схем, спираючись на курси фізики та математики.

Цей курс є основою для вивчення в подальшому таких предметів як "Основи комп'ютерної схемотехніки" та "Архітектура ЕОМ".

## Лекція № 2

**Тема: Електричні кола постійного струму. Основні поняття. Поняття електричного кола. Елементи кола, його характеристики і параметри.**

### План.

1. Основні визначення електричного кола (визначення електричного кола та його елементів).
2. Величини електричного кола (поняття і обчислення струму, напруги, ЕРС).
3. Енергетичний баланс в колі потужність приймача, потужність джерела, баланс енергій і потужностей Умовно – додатні напрями.
4. Параметри електричного кола (поняття і обчислення електричного опору і провідності, ємності, індуктивності).
5. Елементи електричного кола (елементи реальні та ідеальні, активні і пасивні, поняття двополюсника, режими роботи двополюсника; поняття схеми заміщення).
6. Режими роботи джерела живлення (режими номінальний, неробочий та

короткого замикання; коефіцієнт корисної дії джерела; поняття джерела ЕРС та джерела струму).

7. Теплова дія струму (формули визначення кількості виділеного тепла, формула залежності опору від температури).

### Основні визначення електричного кола

**Електричне коло** – це сукупність пристроїв, що генерують, передають, перетворюють та споживають електричну енергію. Пристрої, призначені для генерування електричної енергії, називаються **джерелами електричної енергії**, або **джерелами живлення**, або джерелами електрорушійної сили (ЕРС), або джерелами струму. Пристрої, що споживають електричну енергію, називаються **приймачами електричної енергії** або **навантаженням**. Приймачами електричної енергії можуть бути:

- привідні електродвигуни різних типів;
- лампи розжарювання, нагрівальні та освітлювальні прилади;
- електрохімічні та радіотехнічні прилади тощо. **Перетворювачі** електричної енергії можуть розглядатися для різних сторін електричного кола як джерела або як споживачі енергії (наприклад, трансформатори).

Кожний пристрій електричного кола має назву **елемента електричного кола**.

### Величини електричного кола

До величин електричного кола належать:

- електричний струм;
- електрична напруга;
- електрорушійна сила.

**Електричний струм** – це, спрямований рух носіїв електричних зарядів у провідному середовищі під дією електричного поля.

Якщо швидкість руху електричних зарядів не змінюється з часом, то струм називається **постійним**.

**Величину електричного струму (силу струму)** – кількість електричного заряду, перенесеного через поперечний перетин провідника за одиницю часу – позначають літерою  $I$ :  $I = Q / t$ ,

вимірюють в амперах ( $A$ ). Прилад для вимірювання – амперметр.

Струм, який змінюється з часом за величиною і напрямом, називається **змінним**. Тобто, змінний струм є функцією часу.  $I$  сила струму визначається як

швидкість зміни кількості заряду, що переноситься:  $i = \frac{dQ}{dt}$

Якщо миттєве значення струму повторюється через рівні проміжки часу, то він називається **періодичним змінним**. Струм, який змінюється за синусоїдним законом, називається **змінним синусоїдним**.

Струм з'являється в електричному колі тоді, коли на його затискачах створено різницю потенціалів (існує електричне поле вздовж ділянки кола).

Різниця потенціалів між двома точками електричного кола називається **напругою** або **спадом напруги**.

Напругу позначають літерою  $U$ , вимірюють у вольтах ( $V$ ). Прилад для вимірювання – вольтметр.

Потенціал заданої точки кола позначають літерою  $\phi$  з відповідним індексом, наприклад, для точок 1 і 2 потенціали  $\phi_1$  і  $\phi_2$ , а різниця потенціалів  $U_{12} = \phi_1 - \phi_2$

Такий запис означає, що  $\phi_1 > \phi_2$  і напруга  $U_{12}$  - позитивна.

Електрична напруга чисельно дорівнює роботі  $A$ , яка виконується джерелом електричної енергії при переміщенні заряду в один кулон з однієї точки кола в іншу:  $U_{12} = \frac{A_{12}}{Q}$

Тобто, можна сказати, що **напруга** – це енергія, яку кожний електричний заряд при проходженні даної ділянки кола.

**Електрорушійна сила (ЕРС)** – це енергія, яку одержує кожний електричний заряд у джерелі електричної енергії. ЕРС створюється енергією сторонніх (неелектричних) сил всередині джерела при перетворенні неелектричних видів енергії в електричну. Позначається літерою  $E$ .

Розмірність ЕРС:  $[E]=V$  (вольт)

### **Енергетичний баланс в колі**

**Потужність** - це кількість електричної енергії  $W$ , утвореної (виробленої) - для виконання роботи  $A$  - або спожитої (при виконанні роботи) за одиницю часу. Позначається літерою  $P$ :  $P = \frac{W}{t} = \frac{A}{t}$ .

Одиниці вимірювання потужності:  $[P]=Wt$  (ватт)

Для переміщення заряду по замкненому електричному колу джерело енергії має виконувати роботу, що чисельно дорівнює електрорушійній силі ( $E$   $P$   $S$ ):

$$E = A / Q, \quad A = E Q.$$

Отже, потужність, яку розвиває джерело,  $P_{дж} = E \frac{Q}{t} = E \cdot I$

**Енергія джерела (вироблена)**  $W_{дж} = P_{дж} \cdot t = E \cdot I \cdot t$

Для підтримання струму в електричному колі джерело електричної енергії повинно утворювати різницю потенціалів на вхідних затискачах кола.

А робота по перенесенню зарядів через споживач –  $A = UQ$

Отже, потужність споживання  $P_{cn} = E \frac{Q}{t} = E \cdot I$ , де  $U$  - спад напруги на ділянці кола (на споживачі),  $I$  – струм на тій ділянці (через споживач).

**Енергія споживача (витрачена, спожита)**  $W_{cn} = P_{cn} \cdot t = E \cdot I \cdot t$

За загальним законом збереження енергії :

уся вироблена джерелом енергія має бути витрачена, а виробляє джерело стільки енергії, скільки її споживається.

Це твердження записується у вигляді **балансу енергій** або **балансу потужностей** в електричному колі:

$$W_{дж} = \sum W_{cn} + W_{втр},$$

де  $\sum W_{cn}$  – сума енергій усіх споживачів зовнішнього кола,

$W_{втр}$  – енергія внутрішніх втрат джерела;

$$\text{або } P_{дж} = \sum P_{cn} + P_{втр},$$

де  $\sum P_{cn}$  – сума енергій усіх споживачів зовнішнього кола,

$P_{втр}$  – потужність внутрішніх втрат джерела.

**Умовно-додатні напрями:**

- **умовно-додатний напрям струму** (далі – додатний напрям струму, або напрям струму) – це напрям руху позитивних зарядів;
- **умовно-додатний напрям напруги** (далі – додатний напрям напруги, або напрям напруги) – це напрям зменшення потенціалу, тобто – від більшого потенціалу до меншого;
- **умовно-додатний напрям ЕРС** (далі – додатний напрям ЕРС, або напрям ЕРС) – це напрям дії сторонніх сил у джерелі живлення, тобто – від низького потенціалу до високого.

Умовно-додатні напрями струму та ЕРС джерела збігаються. Умовно-додатні напрями струму та напруги на елементах споживача збігаються. Умовно-додатні напрями струмів, напруг та ЕРС на схемах позначаються стрілками.

**Параметри електричного кола**

До **параметрів** електричного кола належать:

- електричний опір (провідність);
- ємність;
- індуктивність;
- взаємна індуктивність.

**Електричний опір (R)** характеризує спроможність елемента перетворювати електричну енергію на тепло (через зштовхування носіїв заряду з атомами та молекулами провідника).

Величина електричного опору визначається розмірами (довжиною  $l$ , площею

поперечного перерізу  $S$ ) та питомим опором проводу ( $\rho$ ):  $R = \rho \frac{l}{S}$ ,

вимірюється в омах (Ом).

Інколи замість поняття опору вживається поняття **провідності**  $G=1/R$ , яка вимірюється в сименсах (См)

**Електрична ємність (C)** характеризує спроможність елемента (системи електродів) накопичувати електричні заряди (тобто створювати електричне

поле). Ємність є коефіцієнтом пропорційності між величиною заряду, накопиченого на електродах, і напругою між цими електродами:  $Q = C U$

Одиниця вимірювання – фарада (в реальності - мікрофарада, нанофарада)

Якщо електроди – плоскопаралельні пластини, то ємність визначається розмірами електродів (площею поверхні  $S$  одного з них), відстанню між ними (d) та електричними властивостями діелектрика ( $\epsilon$ ):  $C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d}$

**Індуктивність (L)** характеризує спроможність елемента збуджувати магнітне поле (перетворювати електричну енергію на магнітне поле) і є коефіцієнтом пропорційності між величиною магнітного потоку і силою струму, що створює цей потік:  $\Phi \cdot w = \Psi = LI$

Одиниця індуктивності - генрі (Гн); на практиці - мілігенрі, мікрогенрі.

Індуктивність також залежить від конструкції пристрою - розмірів ( $S, l$ ) і кількості витків ( $w$ ), а також від магнітних властивостей середовища ( $\mu$ ):

$$L = \mu \mu_0 \frac{Sw^2}{l} \quad (\text{наближена формула для циліндричної котушки})$$

**Взаємна індуктивність (M)** характеризується впливом двох індуктивних параметрів ( $L_1, L_2$ ) один на одного:

$$M = k \sqrt{L_1 L_2}$$

### Елементи електричного кола

У загальному випадку кожний реальний елемент має  $R, L$  та  $C$ .

Інколи є можливість обмежитися лише одним параметром. Такі елементи, що мають тільки один параметр, називаються **ідеальними**.

Наприклад, ідеальне джерело живлення має тільки  $E$ , ідеальний опір – тільки  $R$  тощо.

Елементи електричного кола бувають активними та пасивними. Якщо роботу елемента описують за допомогою поняття параметрів ( $R, L, C$  та  $M$ ), цей елемент – **пасивний**. Якщо для опису роботи елемента потрібно вживати поняття величини електричного кола ( $I, U, E$ ), то цей елемент – **активний**.

До активних елементів належать усі джерела живлення та деякі приймачі (акумулятори, двигуни тощо).

Джерела живлення утворюють внутрішню ділянку, а приймачі – зовнішню ділянку кола. Ці ділянки відокремлюються *полюсами*.

Ділянка кола, відокремлена двома полюсами, має назву **двополюсника**. Якщо двополюсник містить хоча б один активний елемент, цей двополюсник **активний**. Пасивний двополюсник містить тільки пасивні елементи.

Як і двополюсники, ділянки кола також бувають активні та пасивні. Якщо напрямки струму та напруги ділянки кола протилежні, ця ділянка працює у

режимі джерела живлення. Якщо напрямки струму та напруги збігаються, ця ділянка працює у режимі приймача електричної енергії.

### **Схеми заміщення**

Для вивчення процесів в електричних колах складають математичну модель, що містить окремі ідеальні елементи (параметри). Графічне зображення реального кола за допомогою ідеальних елементів, параметрами яких є параметри реальних заміщених елементів, має назву *схеми заміщення*.

Інколи один і той же елемент у схемі заміщення може бути представлений різними параметрами. Таким чином, котушка індуктивності у колі постійного струму характеризується резистивним параметром (якщо величиною її електричного опору не можна знехтувати), у колі змінного струму – параметрами  $R$  та  $L$ , а у колі височастотного струму електричні властивості котушки описуватимуться трьома параметрами -  $R$ ,  $L$  та  $C$ .

### **Режими роботи джерела живлення**

Розрізняють характерні режими роботи джерела живлення:

- номінальний;
- неробочий (або режим холостого ходу);
- короткого замикання;
- узгоджений.

Режим роботи визначається співвідношенням між опором навантаження ( $R_H$ ) та внутрішнім опором джерела живлення ( $R_{внтр}$ ).

Важливим показником раціональної роботи джерела електричної енергії є **коефіцієнт корисної дії** (ККД), який визначається відношенням потужності у навантаженні ( $P_H = R_H I^2$ ) до повної потужності, що виробляється джерелом електричної енергії ( $P_{дж} = E I$ ):

$$\eta = \frac{P_H}{P_{дж}} = \frac{P_{дж} - \Delta P}{P_{дж}},$$

де  $\Delta P = R_{вн} I^2$  – втрати потужності джерелом енергії (через внутрішній опір джерела).

**Номінальний режим**, гарантує оптимальні параметри джерела живлення, його надійність та довговічність. Номінальний режим забезпечується, коли  $R_H > R_{внтр}$ . У цьому режимі значна частина потужності передається у навантаження при досить великому ККД ( $>0,5$ ).

**Неробочий режим** (цей режим також називають **холостим ходом**) – це режим, за якого зовнішнє коло розімкнене. Напруга на клеммах джерела є максимальною і дорівнює його ЕРС, струм у колі відсутній ( $U=E$ ,  $I=0$ ).

**Режим короткого замикання** здійснюється тоді, коли опір навантаження дорівнює нулеві ( $R_H = 0$ ). Напруга на приймачі енергії відсутня ( $U=0$ ), струм короткого замикання дуже великий.

**Узгоджений режим** – це такий режим, за якого у навантаження передається максимальна потужність (вона дорівнює чверті максимальної потужності). При цьому ККД нижчий за ККД у номінальному режимі. У такому режимі  $R_n = R_{внтр}$ .

**ККД джерела ( $\eta$ )** залежить від співвідношення опорів зовнішнього та внутрішнього кіл. У межових режимах:

- а) неробочому ( $R_n = \infty$ )  $\eta \rightarrow 1$ ;
- б) короткого замикання ( $R_n = 0$ )  $\eta = 0$ ;
- в) узгодженому ( $R_n = R_{внтр}$ )  $\eta = 0,5$ .

За співвідношенням  $R_n / R_{внтр}$  джерела електроенергії визначаються як джерела ЕРС або джерела струму. Якщо джерело живлення має дуже малий внутрішній опір ( $R \rightarrow 0$ ), таке джерело підтримує порівняно сталу напругу на навантаженні і називається **джерелом ЕРС**.

Є джерела живлення, що мають дуже великий внутрішній опір. Струм у колі з таким джерелом майже не залежить від опору навантаження і підтримується порівняно сталим. Таке джерело називається **джерелом струму**.

#### **Теплова дія струму.**

При проходженні електричного струму по провіднику (через  $R$ ), електрична енергія перетворюється на теплову. Кількість теплоти, що виділяється математично визначається формулою:

$$Q = I^2 R t \quad (\text{за законом Джоуля-Ленца})$$

і вимірюється в джоулях. Щоб визначити кількість виділеної теплоти в калоріях, треба врахувати співвідношення цих одиниць:  $1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал}$ ,

тобто в калоріях теплота обчислюється за формулою  $Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$

Електричний опір провідника залежить від його **температури**:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)],$$

де  $R_1$ - опір при температурі  $\Theta_1$ ,

$R_2$  - опір при температурі  $\Theta_2$ ,

$\alpha$ - температурний коефіцієнт опору даного матеріалу (довідкові дані).

### **Лекція № 3**

Тема: **Основні закони електричних кіл. Визначення вузла, вітки, контуру в колі. Закон Ома (для ділянки кола, для повного кола). Два закони Кірхгофа.**

#### **План**

1. Графічні елементи схеми (поняття вузла, вітки, контура).
2. Закон Ома (для ділянки, для повного кола).
3. Закони Кірхгофа (формулювання, приклад).
4. Послідовне з'єднання опорів в колі (поняття, напруги та еквівалентний опір).
5. Паралельне з'єднання опорів в колі (поняття, струми та еквівалентний

опір).

б. Послідовне та паралельне з'єднання джерел енергії.

*Основними фізичними законами*, які дозволяють описати будь-які режими електричного кола, є закон Ома і два закони Кірхгофа. Для їх формулювання треба визначитись з деякими термінами. **Віткою** електричного кола називається його ділянка, яка складається з одного або кількох елементів, з'єднаних так, що по них проходить один і той самий струм (послідовне з'єднання). Вітка має два полюси (початок і кінець).

**Вузлом**, або *точкою розгалуження*, називається точка електричного кола, де з'єднано три або більше проводів чи віток.

**Контур** електричного кола являє собою замкнутий шлях, що складається з кількох віток так, що жодна вітка та жоден вузол не зустрічаються в контурі більше одного разу.

Схему електричного кола з її джерелами живлення (два), вузлами (чотири), вітками (шість), контурами (три) та іншими елементами показано на рис. 1.2.1.

### Закон Ома

Відповідно до закону Ома для ділянки електричного кола *сила струму на ділянці кола прямо пропорційна напрузі на цій ділянці*:  $I = U/R$

Для повного електричного кола закон Ома можна подати так: сила струму прямо пропорційна електрорушійній силі  $E$  та обернено пропорційна повному опору кола, величина якого складається з опорів внутрішньої ( $r$ ) та зовнішньої

( $R$ ) ділянок кола, тобто  $I = \frac{E}{r + R}$

### Закони Кірхгофа

1) Рівняння електричного стану струмів для вузла, який часто називають першим законом Кірхгофа, формулюється так:

*алгебраїчна сума струмів у вузлі електричного кола в кожний момент часу дорівнює нулю*, тобто  $\Sigma I = 0$ ;

при цьому струми, які спрямовані до вузла, приймають із знаком плюс, а ті, що витікають з нього, – із знаком мінус.

2) Рівняння електричного стану контуру, а його часто називають другим законом Кірхгофа, формулюється так:

*у замкнутому контурі електричного кола алгебраїчна сума е.р.с, дорівнює алгебраїчній сумі спаду напруг на всіх ділянках контуру*,

тобто  $\Sigma E = \Sigma U = \Sigma (IR)$ .

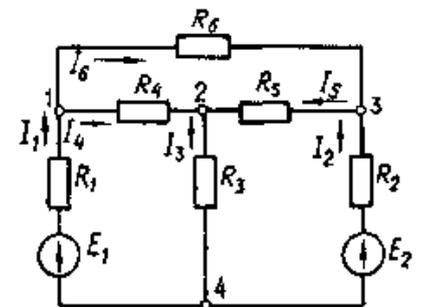
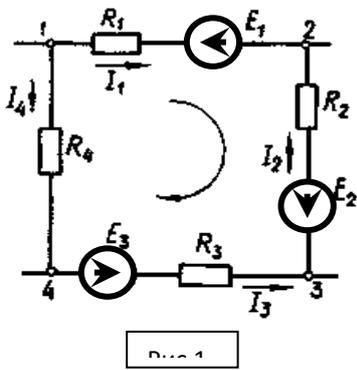


Рис. 1.2.1.



При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа е.р.с. записується зі знаком «+», якщо її напрямок збігається з напрямком

довільно вибраного обходу контуру, тобто якщо при обході після затискача джерела «-» наступає затискач джерела зі знаком «+». В іншому разі е.р.с. записується зі знаком «-». Спад напруги на опорах записується зі знаком «-», якщо напрямок струму в опорі збігається з напрямком обходу контуру.

Наприклад, у схемі на рис.1.2.2 рівняння електричного стану контуру 1–2–3–4 має такий вигляд:

$$E_1 + E_2 - E_3 = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4$$

### Еквівалентні заміни електричних кіл

*Простими електричними колами* називаються кола з одним джерелом енергії. При цьому приймачами можуть бути декілька резисторів, ввімкнених послідовно й паралельно.

Якщо відомі е.р.с. генератора, його внутрішній опір і опір резисторів, то струми в усіх вітках можна знайти, використовуючи метод перетворення (згортання) або метод пропорційних величин (подібності).

Метод перетворення полягає в заміні груп послідовно й паралельно зв'язаних резисторів еквівалентним  $R$ . Потім за рівнянням стану простого контуру знаходять струм у нерозгалуженій частині кола, а далі за допомогою перетворення знаходять струми в усіх вітках заданого кола.

Розглянемо найпоширеніші і найпростіші методи згортання електричних кіл.

### Послідовне з'єднання резисторів.

Якщо декілька резисторів (або приймачів електричної енергії) з'єднані один з одним без розгалужень і по них протікає один і той самий струм, то вони

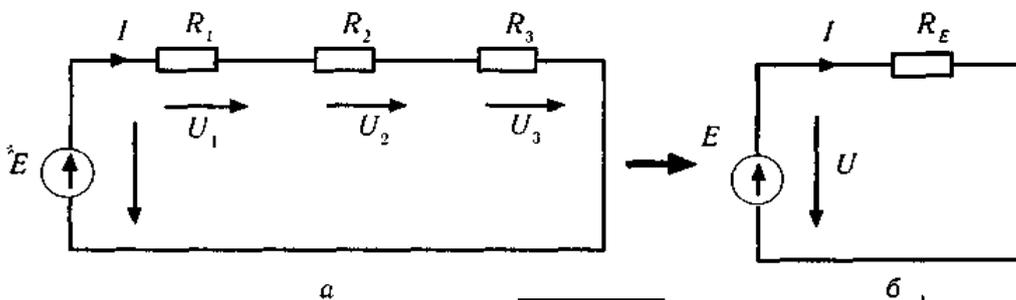


Рис.1.2.3

утворюють одну вітку, і з'єднання резисторів називається послідовним.

Сума напруг на ділянці з послідовним з'єднанням резисторів дорівнює напрузі на затискачах кола:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = I R_1 + I R_2 + I R_3 = I (R_1 + R_2 + R_3)$$

Ряд послідовно з'єднаних резисторів (рис.1.2.3.а) можна замінити **еквівалентним** резистором з опором  $R$  (рис.1.2.3.б), величина якого при незмінній напрузі на затискачах з'єднання не повинна спричиняти зміни напруги в колі.

Отже, еквівалентний опір ряду послідовно з'єднаних резисторів (кількістю  $n$ ) дорівнює сумі їхніх опорів:

$$R_{\text{екв}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

### Паралельне з'єднання резисторів.

Це таке з'єднання, при якому до одних і тих самих двох вузлів

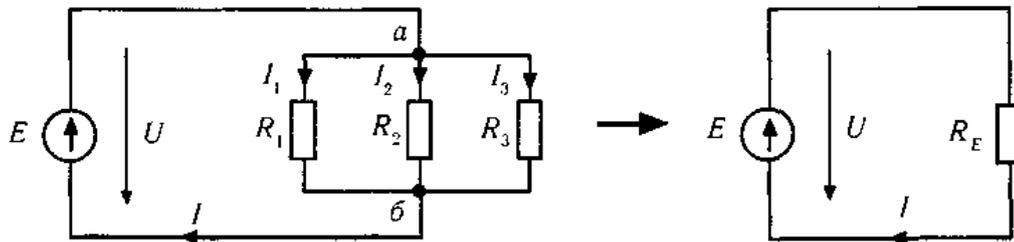


Рис. 1.2.4.

електричного кола приєднано декілька резисторів.

Оскільки резистори приєднано до двох вузлів і кожний із них перебуває під однаковою напругою, то за законом Ома струми в резисторах визначаються за формулами:

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3}.$$

тобто струми в паралельних вітках із резисторами розподіляються обернено пропорційно їхнім опорам.

Ряд паралельно з'єднаних резисторів можна замінити **еквівалентним** з опором  $R$ , значення якого при тій самій напрузі на затискачах з'єднання повинно бути таким, щоб струм в еквівалентному резисторі дорівнював сумі струмів в окремих вітках (за законом Кірхгофа).

Еквівалентний опір кола з паралельно з'єднаними резисторами (кількістю

$n$ ) визначається за формулою:

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

Через те, що напруга на паралельних вітках однакова, то при паралельному з'єднанні приймачів енергії та заданій напрузі режим роботи кожного з них не впливає на режим роботи інших. Споживачі електричної енергії – електродвигуни, лампи розжарювання, електропечі, – які розраховані на роботу з незмінною номінальною напругою, з'єднуються паралельно один з одним.

**Послідовне з'єднання джерел енергії.** Це з'єднання застосовують для отримання більшої е.р.с, для джерел, що мають невеликий внутрішній опір. Загальна е.р.с. при цьому визначається сумою усіх послідовно з'єднаних джерел.

**Паралельне з'єднання джерел енергії.** Це з'єднання застосовують тоді, коли потрібно одержати загальний струм, більший за струм одного джерела. Таке з'єднання джерел енергії використовують при однакових е.р.с. усіх джерел з'єднання.

При паралельному з'єднанні струми окремих джерел енергії додаються.

## Лекція № 4-5

**Тема: Розрахунок простих електричних кіл.**

### План.

1. Поняття простого електричного кола.
2. Змішане з'єднання споживачів в колі.
3. Метод "згортання-розгортання" (поняття та приклад розрахунку кола)
4. З'єднання споживачів трикутником та "зіркою", їх еквівалентна взаємозаміна.

*Простими електричними колами* називаються кола з одним джерелом енергії. При цьому приймачами можуть бути декілька резисторів, ввімкнених послідовно й паралельно.

### **Змішане з'єднання резисторів.**

Змішаним називається послідовно-паралельне з'єднання резисторів або ділянок кола, кожна з яких у свою чергу може складатися з послідовно або паралельно з'єднаних резисторів.

Щоб розрахувати схеми зі змішаним з'єднанням резисторів, треба спочатку умовно замінити паралельне з'єднання резисторів еквівалентним, а потім розрахувати коло з послідовним з'єднанням.

Якщо відомі е.р.с. генератора, його внутрішній опір і опір резисторів, то струми в усіх вітках можна знайти, використовуючи **метод перетворення (згортання)** або *метод пропорційних величин (подібності)*.

Метод перетворення полягає в заміні груп послідовно й паралельно зв'язаних резисторів еквівалентним  $R$ . Потім за рівнянням стану простого контуру знаходять струм у нерозгалуженій частині кола, а далі за допомогою перетворення знаходять струми в усіх вітках заданого кола.

Розглянемо найпоширеніші і найпростіші методи згортання електричних кіл.

**Розрахунок простого кола постійного струму методом „згортання-розгортання” (Приклад №1)**

### Варіант 1.

Задані:

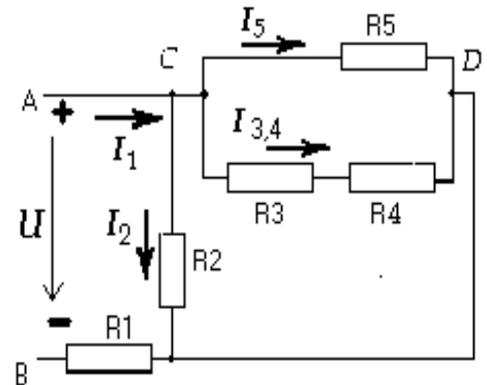
напруга на затискачах кола  $U_{AB} = 150\text{В}$ ;

і опори  $R_1 = 8\ \text{Ом}$ ,

$R_2 = 3\ \text{Ом}$ ,  $R_3 = 10\ \text{Ом}$ ,

$R_4 = 5\ \text{Ом}$ ,  $R_5 = 10\ \text{Ом}$ .

Визначити еквівалентний опір кола, струми в кожному резисторі, а також напруги на резисторах.



#### Розв'язання.

1) Спочатку позначаємо стрілками струм в кожному резисторі, індекс струму повинен відповідати номеру резистора, по якому він йде.

2) Визначаємо загальний опір розгалуження  $R_{CD}$ , враховуючи, що резистори  $R_3$  і  $R_4$  з'єднанні послідовно між собою, а з резистором  $R_5$  паралельно:

$$R_{CD} = \frac{(R_3 + R_4) \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{(10 + 5) \cdot 10}{10 + 5 + 10} = 6\ (\text{Ом})$$

Замінимо три опори на ділянці CD ( $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ) одним еквівалентним -  $R_{CD}$ , після чого схема заміщення прийме вигляд:

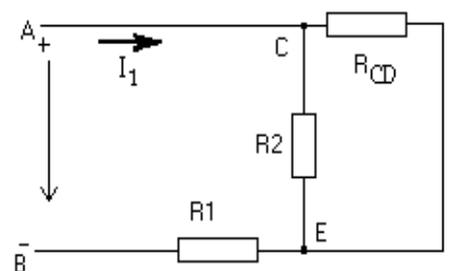
Для цієї схеми:

$U_{AB} = 150\ \text{В}$

$R_1 = 8\ \text{Ом}$

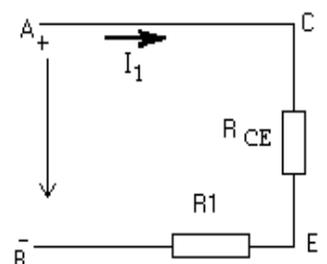
$R_2 = 3\ \text{Ом}$

$R_{CD} = 6\ \text{Ом}$



3) Визначаємо загальний опір кола відповідно точок CE. Резистори  $R_{CD}$  і  $R_2$  ввімкнені паралельно, тому

$$R_{CE} = \frac{R_{CD} \cdot R_2}{R_{CD} + R_2} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2\ (\text{Ом})$$



Замінімо опори на ділянці CE ( $R_{CD}$  і  $R_2$ ) одним еквівалентним -  $R_{CE}$ , після чого схема заміщення прийме вигляд:

Для цієї схеми:

$$U_{AB} = 150 \text{ В}$$

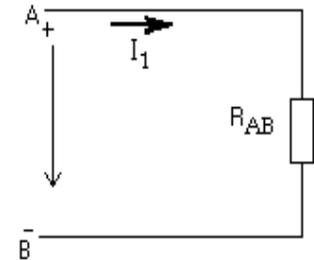
$$R_1 = 8 \text{ Ом}$$

$$R_{CE} = 2 \text{ Ом}$$

4) Знаходимо еквівалентний опір всього кола, що тепер складається з двох послідовно з'єднаних опорів ( $R_1$  і  $R_{CE}$ ):

$$R_{AB} = R_1 + R_{CE} = 8 + 2 = 10 \text{ (Ом)}$$

Схема еквівалентної заміни матиме вигляд:



5) Визначаємо струми в резисторах кола.

а) Оскільки напруга  $U_{AB}$  прикладена до всього кола, а  $R_{AB} = 10 \text{ Ом}$ , то згідно із законом Ома :

$$I_1 = \frac{U_{AB}}{R_{AB}} = \frac{150}{10} = 15 \text{ (А)}$$

---

**Увага !!!** Неможливо останню формулу написати у вигляді  $I_1 = U_{AB}/R_1$ , тому що напруга  $U_{AB}$  прикладена до всього кола (що має опори  $R_1$  і  $R_{CE}$ ), а не до ділянки  $R_1$ .

---

б) Для визначення струму  $I_2$  знаходимо напругу на резисторі  $R_2$  ( $U_{CE}$ ). За умовою, напруга  $U_{CE}$  менше напруги  $U_{AB}$  на величину спаду напруги на резисторі  $R_1$  :

$$U_{CE} = U_{AB} - I_1 \cdot R_1 = 150 - 15 \cdot 8 = 30 \text{ (В)},$$

$$\text{Тоді } I_2 = \frac{U_{CE}}{R_2} = \frac{30}{3} = 10 \text{ А}$$

в) Оскільки  $U_{CE} = U_{CD}$ , то можна визначити струми  $I_{3,4}$  та  $I_5$  :

$$U_{CD}$$

$$2 \text{ (A)} \quad \frac{0}{10+5} = \frac{3}{10+5} I_{3,4} =$$

$$I_5 = \frac{0}{0} = 3 \text{ (A)}$$

6)  $\frac{5}{5}$  Перевіримо вірність визначення струмів за першим законом Кірхгофа, записаного для вузла С:

$$I_1 = I_2 + I_{3,4} + I_5$$

$$15 = 10 + 2 + 3 = 15 \text{ (A)}$$

### **Варіант 2.**

Нехай в схемі приклада відомі опори всіх резисторів, а замість напруги  $U_{AB}$  заданий один із струмів, наприклад  $I_2 = 2 \text{ A}$ . Треба знайти останні струми і напругу  $U_{AB}$ .

Знаючи  $I_2$ , визначаємо :  $U_{CE} = I_2 \cdot R_2 = 2 \text{ (A)} \cdot 3 \text{ (Ом)} = 6 \text{ (В)}$

Оскільки  $U_{CE} = U_{CD}$ ,

$$I_{3,4} = \frac{U_{CD}}{(R_3 + R_4)} = \frac{6}{10+5} = 0,4 \text{ (A)}$$

$$I_5 = \frac{U_{CD}}{0} = 0,6 \text{ (A)}$$

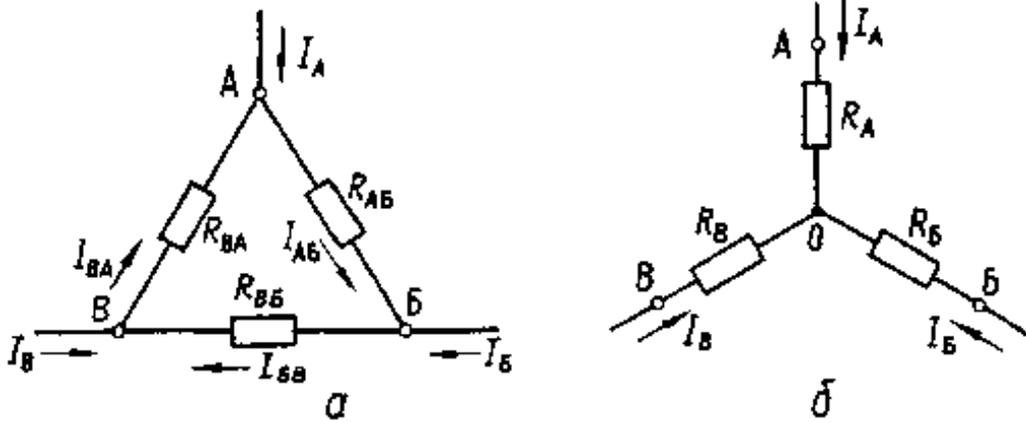
Згідно з першим законом Кірхгофа

$$I_1 = I_2 + I_{3,4} + I_5 = 15 = 2 + 0,4 + 0,6 = 3 \text{ (A)},$$

тоді  $U_{AB} = U_{CE} + I_1 \cdot R_1 = 6 + 3 \cdot 8 = 30 \text{ (В)}$ .

Крім послідовного і паралельного з'єднань опорів, зустрічаються ще з'єднання **трикутником** та **"зіркою"** (рис.1.2.4).

У деяких випадках розрахунок електричного кола значно спрощується, якщо трикутник опорів замінити зіркою опорів, тобто трьома вітками, які мають додатковий загальний вузол О. В інших випадках розрахунку кіл виникає потреба зірку замінити трикутником.



Ці заміни трикутника й зірки опорів повинні бути еквівалентними, тобто при відповідно однакових напругах між вершинами А, Б, В трикутника і зірки струми  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_B$  у підвідних проводах (вітках) повинні залишатися без змін. Рівність струмів повинна виконуватися за будь-яких змін і перемикань в інших частинах кола.

Опори еквівалентної зірки можна знайти за формулами:

$$R_A = \frac{R_{AB}R_{BA}}{R_{AB} + R_{BA} + R_{BB}}; \quad R_B = \frac{R_{AB}R_{BB}}{R_{AB} + R_{BA} + R_{BB}}; \quad R_B = \frac{R_{BB}R_{BA}}{R_{AB} + R_{BA} + R_{BB}}.$$

Отже, *опір вітки еквівалентної зірки дорівнює добутку опорів двох сторін трикутника, які приєднані до тієї самої вершини, що й вітка зірки, поділеному на суму опорів усіх сторін трикутника.*

Для заміни зірки еквівалентним трикутником користуються формулами

$$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_B}; \quad R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_B}; \quad R_{BB} = R_B + R_B + \frac{R_B R_B}{R_A}.$$

Таким чином, *опір сторони еквівалентного трикутника дорівнює сумі опорів двох віток зірки, приєднаних до тих самих вершин, що й сторона трикутника, та їхньому добутку, поділеному на опір третьої вітки зірки.*

Розгалужені електричні кола, які мають декілька контурів із довільним розміщенням приймачів і джерел живлення, належать до складних кіл, якщо їх не можна розрахувати, використовуючи тільки закон Ома і перший закон Кірхгофа. Методи розрахунку складних кіл розглядаються, нижче.

## Лекція № 6

Тема: **Електрична ємність провідників. Конденсатор. Основні поняття.**

### План

1. Поняття електричної ємності провідників.
2. Конденсатор. Основні поняття.
3. Діелектрична проникність.

## Поняття електричної ємності провідників.

Ємність є однією з найважливіших властивостей провідників. Збільшення заряду у визначену кількість разів, у стільки ж разів збільшує напруженість, яку створює поле, а відповідно і потенціал таким чином можна записати:

$$Q = C \cdot \varphi$$

де  $C$  – деяка постійна величина, яка називається ємністю провідника;

$Q$  - величина заряду;

$U$  - потенціал тіла;

$\varphi$  -

$$C = \frac{Q}{\varphi}$$

$$C = \frac{Q}{U}$$

**Ємність провідника** – це фізична величина, яка характеризує здатність провідника накопичувати електричний заряд і дорівнює відношенню заряду провідника до його потенціалу.

Або **електричною ємністю** тіла називають його здатність утримувати на собі електричний заряд при потенціалі, що дорівнює 1 В.

Ємність такого провідника, збільшення заряду якого на 1 Кл призводить до підвищення його потенціалу на 1 В, така одиниця називається – **фарадою**, або така ємність при якій тіло здатне утримувати на собі 1 Кл електричного заряду при потенціалі 1 В.

Фарада дуже велика одиниця, тому на практиці використовують більш менші:

$$1 \text{ мкф} = 10^{-6} \text{ ф};$$

$$1 \text{ пф} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

Величина електричної ємності тіла визначається їх зовнішньою поверхнею. Електрони, які попадають на поверхню тіла під дією зовнішніх сил, відштовхуються полями власних електронів даного тіла і не маючи можливості проникнути в середину тіла, залишаються на його поверхні. Отже, чим більше зовнішня поверхня тіла, тим більше можна надати йому заряд при одному й тому ж потенціалі, а якщо тіло утримує більше заряд – ємність у нього більше.

### 1. Конденсатор. Основні поняття.

Для отримання порівняно великих по величині електричних зарядів, виготовляють спеціальні прилади, що називають **конденсаторами** (елемент електричного кола, призначений для використання його ємності). **Конденсатор** (рос. *конденсатор*, англ. *condenser, capacitor*; нім. *Kondensator m*)

– система з двох чи більше електродів (*обкладок*), які розділені

діелектриком, товщина якого менша у порівнянні з розміром обкладок. Така система має взаємну ємність і здатна зберігати електричний заряд. У 1745 році в Лейдені німецький фізик Евальд Юрген фон Клейст та голландський фізик Пітер ван Мушенбрук створили перший конденсатор – «лейденську банку».

### Характеристики конденсаторів:

• **Номінальна напруга** Іншою не менш важливою характеристикою конденсаторів є номінальна напруга – значення напруги, яке позначається на конденсаторі, при якому він може працювати у заданих умовах під час строку служби із зберіганням параметрів у допустимих межах.

• **Питома ємність** Конденсатори також характеризуються питомою ємністю – відношення ємності до об'єму (або маси) конденсатора.

• **Ємність** Основною характеристикою конденсатора є його електрична ємність (точніше *номінальна ємність*), яка визначає накопичений заряд. Типові значення ємності конденсаторів складають від одиниць пікофарад до сотень мікрофарад. Але існують конденсатори з ємністю десятків фарад.

• **Полярність** Більшість конденсаторів із оксидним діелектриком (електролітичні) мають уніполярну провідність, внаслідок чого їх експлуатація можлива тільки при позитивному потенціалі аноду.

• **Тангенс кута втрат** Втрати енергії в конденсаторі визначаються втратами у діелектрику та обкладках. При протіканні змінного струму через конденсатор, вектори напруги і струму зсунуті на кут  $\pi/2 - \delta$  ( $\delta$  – кут діелектричних втрат). При відсутності втрат  $\delta = 0$ . Тангенс кута втрат визначається відношенням активної потужності  $P_a$  до реактивної  $P_p$  при синусоїдній напрузі визначеної частоти. Величина, зворотна  $\text{tg } \delta$ , називається добротністю конденсатора.

• **Електричний опір ізоляції конденсатора** Електричний опір ізоляції – це опір конденсатора постійному струму, яке визначається співвідношенням  $R_{i3} = U/I_{вит}$ , где  $U$  – напруга, що спрямована на конденсатор,  $I_{вит}$  – струм витoku.

• **Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ)** ТКЄ – це параметр, який характеризує залежність ємності конденсатора від температури. Практично ТКЄ визначають як відношення зміни ємності конденсатора при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$ . Але ТКЄ визначається не для всіх типів конденсаторів.

### Класифікація конденсаторів:

- **Конденсатори з газоподібним діелектриком;**
- **Конденсатори з рідким діелектриком;**
- **Конденсатори з твердим неорганічним діелектриком:** скляні, слюдяні, керамічні, тонкошарові із неорганічних плівок;
- **Конденсатори з твердим органічним діелектриком:** паперові, металопаперові, плівочні, комбіновані;

•**Електролітичні та оксидо-напівпровідникові конденсатори.** Такі конденсатори відрізняються від інших типів перш за все своєю величезною питомою ємністю. В якості діелектрика використовується оксидний шар на металі, який є анодом. Друга обкладка (катод) – це або електроліт (у електролітичних конденсаторах) або шар напівпровідника (у оксидно-напівпровідникових), нанесений безпосередньо на оксидний шар. Анод виготовляється, в залежності від типу конденсатора, з алюмінієвої, ніобієвої чи танталової фольги.

### **Використання конденсаторів**

•Конденсаторам знаходиться використання практично у всіх галузях електротехніки.

•Конденсатори використовуються як фільтри при перетворенні змінного струму на постійний.

•При з'єднанні конденсатора з катушкою індуктивності утворюється коливальний контур, який використовується у пристроях прийому-передачі.

•За допомогою конденсаторів можна отримувати імпульси великої потужності, наприклад, у фотоспалахах.

•Оскільки конденсатор здатний довгий час зберігати заряд, то його можна використовувати в якості елемента пам'яті.

Найпростішим конденсатором являється плоский конденсатор, який складається з двох однакових металевих пластин, розділених шаром повітря, або іншого матеріалу, в якому не має вільних електронів. Такі матеріали називають **діелектриками**. Особливість плоского конденсатора у порівнянні з іншими конденсаторами в тому, що електричне поле між його пластинами рівномірне, тобто напруженість такого поля в будь-якій точці однакова. Рівномірне поле зображають однаковою густиною стрілок. Електричні заряди на пластинах конденсатора розташовуються тільки на одній стороні (внутрішній) під дією електричних сил тяжіння, що виникають.

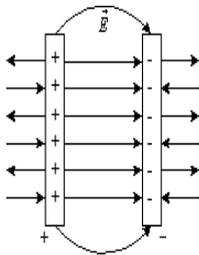
**Електрична ємність** плоского конденсатора, яку розуміють як ємність однієї з пластин (будь-якої) визначають за формулою:

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d}$$

Де **S** – однієї сторони пластини в м<sup>2</sup> ;

**d** – відстань між пластинами в м ;

**ε** – діелектрична проникність ізолюючого шару.



Схематичне зображення плоского конденсатора.

Якщо одні й ті ж самі заряджені тіла при незмінній відстані між ними, помістити у вакуумі і в будь-якому іншому середовищі (ізолюючому), наприклад у воді, то сили взаємодії будуть різними, у воді сили у 81 раз менше ніж у вакуумі. На взаємодію між зарядженими впливає і середовище в якому вони знаходяться. Для врахування впливу середовища введено величину, яку називають **діелектричною проникністю** середовища. Так середовище, яке відрізняється від вакууму, завжди зменшує сили взаємодії між зарядженими тілами, то у формулі закону Кулона діелектричну проникність вводять у знаменник:

$$F = q_1 \cdot q_2 / \epsilon \cdot r^2$$

Діелектрична проникність для різних діелектриків, у відповідності з прийнятою у нас системою одиниць вимірювання, може бути представлена як добуток двох співмножників:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Де  $\epsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл/В·м;

$\epsilon_r$  відносна проникність, яка представляє собою число, що вказує у скільки разів діелектрична проникність середовища більше діелектричної проникності вакууму.

## Лекція № 7.

Тема: **Магнітні кола. Магнетизм та електромагнетизм. Основні поняття.**

### План

1. Магнетизм та електромагнетизм. Основні поняття.
2. Основні характеристики магнітного поля.
3. Магніти та їх властивості.
4. Магнітне поле електричного поля.

***Магнетизм – це особливий прояв руху електричних зарядів в середині атомів і молекул, який проявляється в тому, що деякі тіла здібні притягувати до себе і утримувати частини заліза, нікелю та інших металів.***

Такі тіла називають магнітними.

Приклад: компас являється магнітом і встановлюється в магнітному полі Землі так, що один кінець вказує напрямком на північ і називається «північним

полюсом» - N, а протилежний кінець «південний полюс» - S.

В залежності від призначення, магнітам надають різну форму:

- Прямокутну;
- Ромбічну;
- Круглу;

Магніт будь-якої форми має два полюси: «південний» і «північний». Якщо намагнічений стрижень розділити на декілька частин, то кожна з них буде мати два полюси, отримати магніт з одним полюсом не можливо. Навколо будь-якого намагніченого тіла виникає магнітне поле, яке являється матеріальним середовищем, в якому виявляється дія магнітних сил. На малюнках магнітне поле зображають у вигляді магнітних ліній, які мають напрямок від північного полюсу до південного. Будь-яка магнітна лінія не має початку і кінця і уявляє собою замкнену криву, так північний і південний полюси невід'ємні один від одного.

Матеріали, атоми яких не мають магнітного моменту і намагнітити їх не можливо – називають діамагнітними. До них можна віднести абсолютну більшість матеріалів, які зустрічаються в природі, з них є метали (мідь, свинець, цинк, срібло).

Матеріали, атоми яких володіють магнітним моментом і можуть намагнічуватися - називають парамагнітними, до них відносяться: алюміній, олово, марганець.

Виключення складають ферромагнітні матеріали, атоми яких володіють великим магнітним моментом і дуже легко намагнічуються. До них можна віднести: залізо, сталь, чавун, нікель, кобальт та інші.

Електромагнітами називають електромеханічні прилади, які перетворюють електричну енергію в механічну і виконують механічні операції (підйом вантажів, протягування, штовхання, утримування та інші.)

Навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле впливає на магнітну стрілку, два провідники взаємодіють один з одним. Силова дія магнітного поля має і другі прояви. Якщо по провіднику, зігнутому у вигляді кільця, пропустити електричний струм то під його дією виникне магнітне поле. Провідник зігнутий спіралью і складений з кількох витків, розташованих так що осі їх співпадають, називається соленоїдом. При проходженні струму через обмотку соленоїда, чи один виток провідника, збуджується магнітне поле, напрям якого визначають за правилом буравчика.

За класичною теорією електромагнетизму джерелами магнітного поля є макро та мікроструми. Фарадеєм був запроваджений термін «магнітне поле». Згодом класичну теорію магнітного поля побудував Максвелл, а у XX сторіччі з'явилась квантова теорія магнітного поля.

Магнітне поле характеризується рядом величин. Важливішою з них, що

характеризує інтенсивність магнітного поля, являється магнітна індукція

Магнітна індукція – це векторна величина, яка визначає силу, діючу в даній точці поля, на електричні заряди що рухаються, і дія поля на тіло яке володіє магнітними властивостями. Напрямок вектора **B** співпадає з напрямком магнітних ліній, які називаються лініями магнітної індукції.

В якості одиниці магнітної індукції прийнята – **тесла (Тл)**, яка представляє собою інтенсивність магнітного поля, при якій на провідник довжиною **1 м**, розташований перпендикулярно напрямку ліній магнітного поля, з протікаючим по ньому струмом **1 А**, діє сила **1 Н**.

При розрахунках багатьох електротехнічних пристроїв використовують величину, яку називають магнітним потоком, або потоком вектора магнітної індукції. Поток вектора магнітної індукції **Φ** через площину **S** в однорідному магнітному полі, називають величину, що дорівнює проекції вектора магнітної індукції на нормаль **n** до площини, помноженої на величину площини:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Якщо в однорідному магнітному полі площина **S** перпендикулярна лінії магнітної індукції, то

$$\Phi = B \cdot S$$

В якості одиниці потоку вектора магнітної індукції прийнято **вебер (Вб)**, який представляє собою величину потоку в однорідному магнітному полі, який проходить при магнітній індукції **1 Тл** через площину **S**, **1 м<sup>2</sup>**, розташовану перпендикулярно магнітним лініям поля, тобто

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$$

Напруженість магнітного поля являється кількісною характеристикою, вона не залежить від магнітних властивостей, а кількісно визначає той вклад в магнітну індукцію, який вносить зовнішні прилади, збуджуючи магнітне поле. Напруженість **H** пов'язана з індукцією в конкретному середовищі.

$$B = \mu_{\text{абс}} \cdot H$$

Де  $\mu_{\text{абс}}$  – абсолютна магнітна проникність.

$\mu_0$  – абсолютна проникність у вакуумі.

Намагнічуючою силою котушки зі струмом називають добуток числа витків на струм який протікає по ній.

$$F = \omega \cdot I$$

Магнітна напруга між точками **a** і **b**, розташованими на одній лінії магнітної індукції в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку напруженості поля і відстані між цими точками - **l**.

$$U_m = H \cdot l$$

Магнітна напруга вимірюється в амперах, **A**.

**Закони електромагнетизму.**

Електричний струм збуджує магнітне поле. Ця здатність струму

характеризується *магніторушійною силою ( МРС)*. Ця сила називається ще *намагнічуючою, або повним струмом*. Магніторушійна сила чисельно дорівнює силі струму. Дослідним шляхом було встановлено *закон повного струму – циркуляція вектора напруженості за замкнутим контуром дорівнює повному струмові, що зчеплений з цим контуром*.

$$\int \mathbf{H}d\mathbf{l} = \sum \mathbf{I} = \mathbf{F}$$

Додатними вважають струми, напрям магнітного поля яких збігаються з напрямом обходу контура. Напрямок магнітного поля визначається за правилом буравчика – если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение его рукоятки указывает направление магнитных линий поля, образующегося вокруг этого проводника.

За допомогою закону повного струму можна розв'язати багато академічних задач. Наприклад, визначимо напруженість магнітного поля на довільній відстані  $X$  від провідника зі струмом  $I$ . замкненим контуром можна обрати коло, що має радіус  $X$ , тоді за законом повного струму

$$\int \mathbf{H}d\mathbf{l} = I;$$

$$H2\pi X = I;$$

$$H=I/2\pi X$$

Котушка індуктивності, що вмикається в джерело постійного струму, має МРС

$$\mathbf{F} = w \cdot \mathbf{I}$$

Де  $w$ - число витків;

$I$  – сила струму у котушці.

На провідник зі струмом, що знаходиться в магнітному полі, діє сила. Ця сила пропорційна струму, магнітній індукції та активній довжині провідника, тобто

$$\mathbf{F} = BIl\sin\alpha$$

Де  $\alpha$ - кут між  $B$  та  $I$ . напрям дії сили визначається за правилом лівої руки.

Цей закон називається –*закон електромагнітної сили*.

За законом електромагнітної індукції у провідникові, що рухається у магнітному полі, індукується ЕРС , тобто

$$\mathbf{E} = -vBl\sin\alpha$$

Де  $E$  – ЕРС провідника;

$v$ - швидкість руху провідника.

Напрямок струму визначається правилом правої руки. У загальному разі ЕРС дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, зчепленого з контуром, у якому вона індукується, тобто

$$\mathbf{E}=-d\Phi/dt$$

Знак «-» підтверджує правило Ленца. Тобто ЕРС прагне протидіяти

причині, що її зумовлює.

Перший закон Кірхгофа для магнітного кола: *алгебраїчна сума магнітних потоків будь-якого вузла магнітного кола дорівнює нулеві.*

Другий закон Кірхгофа для магнітного кола – закон повного струму: *алгебраїчна сума МРС, що діють у замкнутому контурі, дорівнює алгебраїчній сумі магнітних напруг на магнітних опорах цього контуру*

### Лекція № 8

Тема: **Електричні кола змінного струму. Основні поняття кіл синусоїдних струмів. Розрахунок кіл синусоїдального струму.**

#### План

1. Поняття про періодичні струми і напруги.
2. Період і частота.
3. Середнє значення періодичних функцій.
4. Рівняння миттєвих значень синусоїдних величин.
5. Графік і параметри синусоїдних струмів і напруг.
6. Діюче і середнє значення синусоїди.

#### Поняття про періодичні струми і напруги.

Синусоїдні електричні величини (ЕРС, струм, напруга) відносяться до гармонійних періодичних змінних величин.

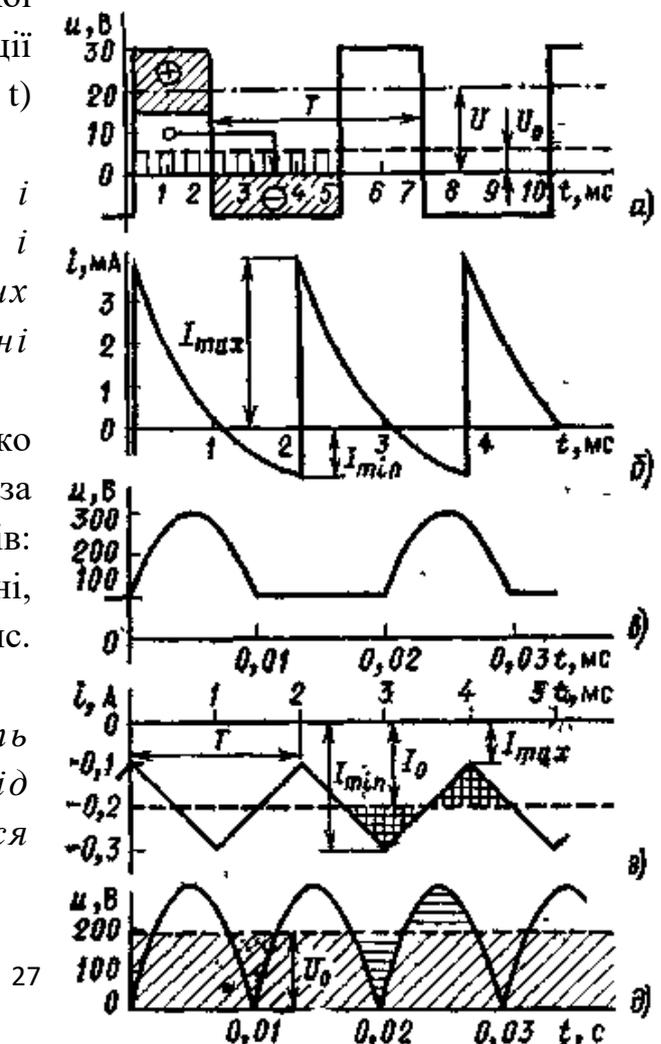
Змінними їх називають, оскільки їх значення змінюються в часі (мають різні значення в різні моменти часу), тобто вони є функціями часу.

Кожне значення будь-якої функції часу (тобто значення функції при заданому значенні аргументу  $t$ ) називають **МИТТЄВИМ**.

Періодичними струмами і напругами називаються струми і напруги, миттєві значення яких повторюються через рівні проміжки часу.

У сучасній техніці широко використовуються різноманітні за формою види періодичних сигналів: прямокутні, експонентні, колоколоподібні, трикутні і т.п. (рис. 3.1.1).

Математична залежність періодичних струмів і напруг від часу  $i(t)$ ,  $u(t)$  називається



**рівнянням їхніх миттєвих значень.**

Для наочного уявлення й описання періодичних функцій  $i(t)$  і  $u(t)$  використовуються їхні часові графіки, побудовані по рівняннях миттєвих значень.

Періодичні струми і напруги мають деякі постійні, незмінні в часі числові параметри. До них відносяться період  $T$  (рис.3.1.1,а), максимальне і мінімальне значення  $I_{max}$  і  $I_{min}$  (рис.3.1.1,б), постійна складова  $I_0$  (рис.3.1.1,г) і т.д.

### **Період і частота.**

Основним параметром періодичних функцій часу (струмів, напруг) є період, що позначається великою літерою  $T$ .

**Періодом** називається найменший проміжок часу, після закінчення якого періодична функція напруги  $u(t)$  чи струму  $i(t)$  повторює свої миттєві значення (рис.3.1.1, а, г).

Крім періоду  $T$  для характеристики періодичних функцій використовується **частота  $f$** , – **число періодів за секунду.**

Частота вимірюється в герцах.

За визначенням **частота є величина, зворотна до періоду:**  $f = \frac{1}{T}$ .

У сучасній техніці використовується широкий діапазон частот електричних сигналів – від сотих часток герца до мільярдів герців.

В електроенергетиці в Європі стандартна частота –50 Гц, у США –60 Гц.

Для живлення апаратури транспортних засобів: літаків, автомобілів, суден, тепловозів використовуються синусоїдні струми з частотою 400, 500 і до 1000 Гц. У багатьох областях техніки використовуються періодичні електричні сигнали в звуковому діапазоні від 50 до  $10^5$  Гц. У радіотехніці, телебаченні, зв'язку, системах керування використовуються періодичні сигнали з частотою до  $10^{10}$  Гц.

### **Середнє значення періодичних функцій.**

Важливою характеристикою періодичних сигналів, наприклад напруги  $u(t)$ , є **середнє значення за період**, що позначається  $U_0$  і називається його

**постійною складовою** (мал. 6.1, а). За визначенням  $U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$

На рис. 3.1.1,а показані графічні побудови по визначенню  $U_0$  відповідно до формули: алгебраїчне підсумовування площ, обмежених підінтегральною функцією. Косим штрихуванням виділені рівні площі негативної (–) і позитивної (+) напівхвиль, що компенсують один одного при інтегруванні, а частина площі, що залишилася, позитивної напівхвилі рівномірно розподілена по всьому періоду  $T$ , включаючи обидві напівхвилі (показано стрілкою).

Чи у всіх періодичних  $u(t)$  і  $i(t)$  є постійна складова? Виявляється, що не в усіх. У періодичних функцій, що є симетричними відносно осі часу, площі позитивної і негативної напівхвиль однакові, а тому постійна складова дорівнює нулеві (негативна величина компенсує позитивну).

### **Рівняння миттєвих значень синусоїдних величин.**

Під впливом синусоїдних ЕРС у лінійних електричних колах і напруги, і струми мають синусоїдну залежність від часу (синусоїдну форму графіка функції). Усі синусоїдні величини (наприклад, напруга) мають стандартну загальну форму запису, яка є *рівнянням миттєвих значень*:

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

де  $U_m$  – амплітуда синусоїдної напруги;

$\omega$  – кутова частота;

$\psi$  – початкова фаза.

Ці три величини є *параметрами* (постійними величинами для конкретної напруги в конкретній задачі), а час  $t$  є *аргументом* часової функції  $u(t)$ .

Отже, для однозначного визначення миттєвих  $u(t)$  або  $i(t)$  необхідно визначити сукупність їхніх трьох параметрів: амплітуду, кутову частоту і початкову фазу.

Синусоїдні напруги і струми одержали найбільше поширення в сучасній техніці завдяки їхнім наступним якостям.

По-перше, пристрої для виробництва (генератори), перетворення (трансформатори) і споживання (асинхронні двигуни) електричної енергії із синусоїдними напругами і струмами досить прості, зручні в експлуатації.

По-друге, синусоїдні величини при лінійних операціях: підсумовуванні, інтегруванні, диференціюванні – залишаються також синусоїдними величинами. Такої властивості не мають ніякі інші функції. За цю чудову властивість синусоїдні часові функції називаються **гармонійними**, тобто досконалими.

### **Графік і параметри синусоїдних струмів і напруг.**

Математичній функції синусоїдної напруги відповідає її часовий графік (рис. 3.1.2), який можна побудувати при відомих параметрах ( $U_m$ ,  $\omega$ ,  $\psi_u$ ) по точках, задаючи послідовно  $t=t_1, t_2, t_3 \dots$  і обчислюючи відповідні значення функції –  $u(t_1), u(t_2), u(t_3)$  і т.д.

Оскільки на практиці для індикації та експериментального вивчення миттєвих струмів і напруг застосовуються осцилографи, то часові графіки будемо називати **осцилограмами**. З використанням осцилограми більш докладно розглянемо параметри синусоїди.

Коефіцієнт при синусі, що є максимальним по модулю миттєвим значенням синусоїди, називається її **амплітудою** і позначається прописними літерами з індексом  $m$  ( $U_m$  чи  $I_m$ ).

Аргумент синусоїдної чи напруги струму (аргумент під знаком синуса), відлічуваний від точки переходу чи напруги токи через нуль до позитивного значення, називається **фазовим кутом** чи просто **фазою**

$$\alpha = \omega t + \psi,$$

де  $\psi$  – **початкова фаза**, тобто значення фазового кута в початковий момент часу при  $t=0$ .

З розглянутого випливає, що синусоїдні функції часу мають аргументом або час  $t$ , або фазовий кут  $\alpha$ . Між двома цими аргументами однієї і тієї ж функції є певний зв'язок. Очевидно, що одному періоду  $T$  синусоїди відповідає зміна фазового кута на  $360^\circ$  (рис. 3.1.2) або – на  $2\pi$  радіан. Оскільки

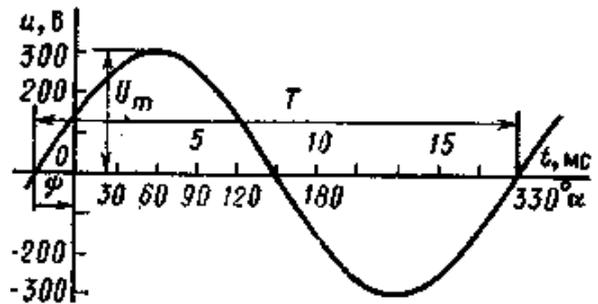


Рис.3.1.2.

при зміні часу на  $\Delta t=T$  фазовий кут  $\alpha = \omega t + \psi$  дістане збільшення на  $2\pi$ , то  $\alpha + 2\pi = \alpha(t+T) + \psi$ . Віднімаючи від отриманого значення його вихідне значення, одержуємо  $2\pi = \omega T$ .

Таким чином,

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f,$$

де  $f = 1/T$  – лінійна частота напруги (або струму).

Параметр  $\omega$  називається **кутовою частотою синусоїдної напруги (струму)** і дорівнює частоті  $f$ , помноженої на  $2\pi$ .

Таким чином, за допомогою параметра  $\omega$  множина значень поточного часу  $t$  переводиться у множину поточних значень фазового кута. Так поточному часу  $t = 0$  відповідає початкова фаза  $\psi$ , а моменту часу  $t=T/2$

відповідає фазовий кут  $\alpha\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{2\pi}{T} \frac{T}{2} + \psi = \pi + \psi$  і т.д.

Отже, на синусоїдному графіку масштаб осі абсцис можна встановлювати або в секундах (вісь часу) або в кутах (вісь фазового кута); між часом і фазовим кутом є взаємо-однозначна відповідність.

Щоб визначити на осцилограмі початкову фазу  $\psi$ , необхідно визначити масштаб по осі абсцис у кутах (одному періоду відповідає  $360^\circ$ ); тоді початкова фаза відраховується від точки перетинання синусоїдою осі абсцис при переході з негативної на півхвилі в позитивну до точки початку координат (мал. 6.4).

Початкова фаза має знак плюс, якщо напрямок відліку збігається з позитивним напрямком відліку кутів (осі абсцис), і знак мінус, якщо має протилежний напрямок. Наприклад, на рис. 3.1.2  $\psi > 0$ .

Відмітимо, що початок координат на осцилограмі при проведенні експериментів можна обирати довільно. Але для однозначного визначення початкових фаз  $u(t)$  і  $i(t)$  воно повинно бути зафіксовано кресленням координатних осей з вибором точки  $O$  або довільно, або з якихось додаткових умов.

### Діюче і середнє значення синусоїди.

Амперметри і вольтметри, що застосовуються для виміру синусоїдних струмів і напруг, показують діючі значення цих величин. Звернімо увагу, що в технічній літературі теж звичайно вказується саме діюче значення струму, напруги, ЕРС.

**Діюче значення** для синусоїди, як і для будь-якої періодичної функції, визначається як середньоквадратичне значення періодичної величини:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{T}{2} U_m^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m.$$

Обчислення діючого значення синусоїди графічно проілюстроване на рис. 3.1.3. Спочатку обчислюється підінтегральний вираз  $u^2(t)$ , потім обчислюється площа, обмежена графіком, тобто провадиться графічне інтегрування за половину періоду. Потім виконується усереднення, тобто знаходиться значення  $U^2$ , при множенні якого на  $T/2$  утворюється площа прямокутника, рівна площі підінтегральної функції. І, нарешті, після добування квадратного кореня виходить  $U = 0,707 U_m$ .

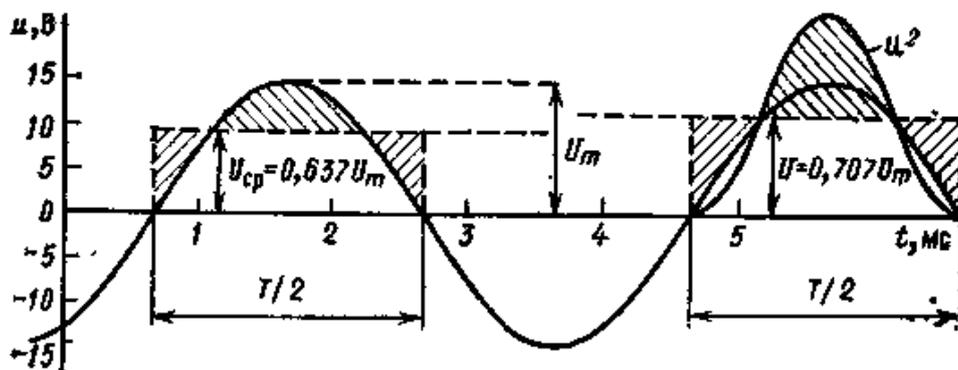


Рис.3.1.3.

**Середнє значення** за період функції, симетричної щодо осі часу, дорівнює нулю. Тому для синусоїди прийнято розглядати **середнє по модулю** значення (середнє значення за півперіод), обираючи  $\psi_u = 0$ :

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = \frac{2}{T} \frac{T}{2\pi} U_m \int_0^{T/2} \left(-\cos \frac{2\pi}{T} t\right) dt =$$

$$= \frac{2}{\pi} U_m \approx 0,637 U_m.$$

На рис. 3.1.3 площа прямокутника  $U_{cp} \times T/2$  за визначенням  $U_{cp}$  дорівнює площі напівхвилі  $\int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt$  (рівні і не спільні частини площ прямокутника і напівхвилі на рис. 3.1.3 заштриховані).

### Приклад 1.

Визначити амплітудне, середнє і діюче значення синусоїдної напруги (рис.3.1.2).

Рішення.

Відповідно до масштабу по осі ординат  $U_m = 300$  В. Тоді

$$U_{cp} = 0,637 \cdot U_m = 191 \text{ В}; U = 0,707 \cdot U_m = 212$$

## Лекція № 9

Тема: **Розрахунок кіл синусоїдних струмів. Нерозгалужене коло змінного струму з  $R, L, C$**

### План

1. Векторна діаграма напруг.
2. Зсув фаз між струмом і напругою в колі.
3. Повний і реактивний опір кола.
4. Зміна зсуву фаз при зміні реактивного опору.
5. Загальний випадок кола з послідовним з'єднанням елементів.
6. Використання векторної діаграми для аналізу послідовного кола.
7. Поняття символів функцій.
8. Комплексне число та форми його запису (повторення з курсу математики).
9. Комплексні зображення гармонічних функцій часу Комплексний запис опору і провідності.
10. Потужність у символічному вигляді.
11. Баланс потужностей в колі.

### Векторна діаграма напруг.

Припустимо, що схема заміщення електричного кола має послідовно з'єднані активний опір, індуктивність та ємність (рис.1).

Тут, як і раніше, прийемо струм в колі синусоїдним:

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Вхідна напруга (повна напруга кола) за другим законом Кірхгофа визначається як сума трьох напруг:

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

Побудуємо векторну діаграму (рис.2) з урахуванням відомих фазових співвідношень.

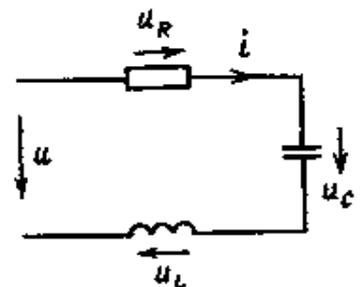


Рис.3..3.1

Напруга на опорі збігається по фазі зі струмом, на ємності вона відстає від струму на  $90^\circ$ , а на індуктивності – випереджає струм на  $90^\circ$ . Підсумовуючи три вектори напруг на елементах кола, одержуємо вектор вхідної напруги.

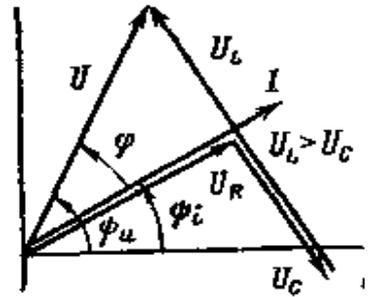


Рис.3.3.2

З векторної діаграми видно, що діюче значення вхідної напруги (повної)

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

В цьому виразі  $U_R$  – активна складова повної напруги кола,  $(U_L - U_C)$  – реактивна складова повної напруги.

### Зсув фаз між струмом і напругою в колі.

Різниця початкових фаз вхідної напруги (повної) і струму в колі є зсувом фаз  $\varphi$ .

Кут  $\varphi$  на векторній діаграмі відраховується від вектора струму до вектора вхідної напруги.

Якщо  $U_L > U_C$ , тобто коло має індуктивний характер, зсув фаз позитивний – напруга випереджає струм на кут  $\varphi$ .

Якщо  $U_L < U_C$ , тобто коло має ємнісний характер, зсув фаз негативний – напруга відстає від струму на кут  $\varphi$ .

**Приклад.** У колі змінного струму (рис.3,а) показання трьох вольтметрів  $V_1$ – $V_3$  відповідно  $U_1=6$  В,  $U_2=12$  В,  $U_3=4$  В; необхідно визначити показання вольтметра V.

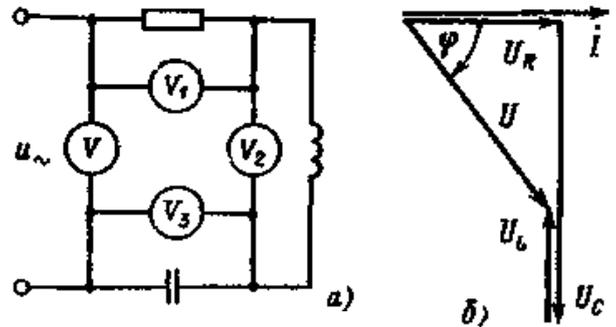


Рис.3.3.3

Рішення. Задавши початкову фазу струму рівною нулю, побудуємо векторну діаграму напруг (рис.3,б). З векторної діаграми визначимо невідоме показання вольтметра V:

$$U = \sqrt{U_1^2 + (U_2 - U_3)^2} = \sqrt{6^2 + (12 - 4)^2} = 10 \text{ В.}$$

### Повний і реактивний опір кола.

Виразимо напруги на елементах через струм і опори:

$$U_R = RI; U_L = X_L I; U_C = X_C I.$$

Підставивши ці вирази у формулу для напруги, одержимо:

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

Звідси повний опір кола з послідовним з'єднанням  $R, L$  і  $C$ :

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

Різниця з'єднаних послідовно індуктивного і ємнісного опорів називається **реактивним опором** кола і позначається  $X = X_L - X_C$ .

Якщо сторони трикутника напруг розділити на діюче значення струму, то одержимо трикутник опорів (рис.4).

Зсув фаз визначимо з трикутника опорів:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg X/R$$

Кут  $\varphi$  у трикутнику опорів відраховується від катета  $R$  до гіпотенузи  $Z$ .

Якщо  $X_L > X_C$ , коло носить індуктивний характер:  $X > 0$ ,  $\varphi > 0$ .

Якщо  $X_L < X_C$ , коло носить ємнісний характер:  $X < 0$ ,  $\varphi < 0$ .

Отже, реактивний опір  $X$  може бути і позитивним, і негативним. Повний опір кола  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  – завжди позитивний.

З трикутника опорів маємо:

$$R = Z \cdot \cos \varphi;$$

$$X = Z \cdot \sin \varphi.$$

**Приклад.**

Для кола рис.1 визначити вхідну напругу, опори кола і зсув фаз, якщо  $I = 5$  А;  $U_R = 100$  В;  $U_L = 150$  В;  $U_C = 75$  В.

Рішення. Згідно з формулою вхідна напруга

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{100^2 + (150 - 75)^2} = 125 \text{ (В)}$$

Опори кола – активний, індуктивний і ємнісний:

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{100}{5} = 20 \text{ (Ом)}$$

$$X_L = \frac{U_L}{I} = \frac{150}{5} = 30 \text{ (Ом)}$$

$$X_C = \frac{U_C}{I} = \frac{75}{5} = 15 \text{ Ом.}$$

Загальний реактивний опір всього кола – позитивний:

$$X = X_L - X_C = 30 - 15 = 15 \text{ Ом.}$$

Повний опір кола

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{20^2 + 15^2} = 25 \text{ Ом.}$$

Зсув фаз між напругою і струмом:  $\varphi = \arctg X/R = \arctg 15/20 = 36^\circ 50'$ .

Коло носить індуктивний характер.

### 1. Зміна зсуву фаз при зміні реактивного опору.

У колі з послідовним з'єднанням  $R$ ,  $L$  і  $C$  (рис.1) характер кола залежить від характеру реактивного опору  $X = X_L - X_C$ , тобто від співвідношення між  $X_L$  і  $X_C$ .

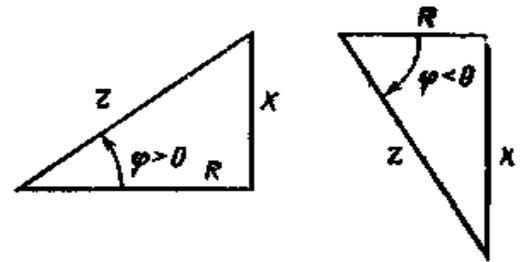


Рис.3.3.4

Якщо  $X_L > X_C$ , то коло носить індуктивний характер. У цьому випадку векторна діаграма (див.рис.2) наочно показує, що  $U_L > U_C$ , а зсув фаз  $\varphi > 0$ . З трикутника опорів (див. рис. 4) випливає, що вихідну схему (рис.1) при таких умовах можна представити еквівалентною схемою, що включає тільки два опори: активний  $R$  і реактивний  $X_L = X = X_L - X_C$ . Таке коло докладно розглянуте в темі "Коло з активним опором і індуктивністю".

Якщо  $X_C > X_L$ , то коло носить ємнісний характер: реактивний опір  $X = (X_L - X_C) < 0$  і зсув фаз  $\varphi < 0$ . У цьому випадку векторна діаграма і трикутник опорів дозволяють зробити висновок, що вихідну схему можна представити еквівалентною схемою з послідовним з'єднанням тільки двох опорів:  $R$  і еквівалентного ємнісного опору  $X_C = X = |X_L - X_C|$ . Це еквівалентне коло докладно розглянуте в темі "Коло з активним опором і ємністю".

Нарешті, якщо  $X_L = X_C$ , то й реактивний опір кола  $X = X_L - X_C = 0$ . У цьому випадку вихідну схему можна представити еквівалентною схемою тільки з одним активним опором  $R$ , що розглянута в темі "Активний опір при змінному струмі".

Отже, у випадку  $X_L = X_C$  навіть при наявності  $L$  і  $C$  коло носить чисто активний характер, а зсув фаз  $\varphi = 0$ . Такий режим називається резонансом напруг і докладно розглянутий раніше.

**2. Загальний випадок кола з послідовним з'єднанням елементів.** У загальному випадку коло з послідовним з'єднанням елементів спрощують на основі методу перетворення.

При послідовному з'єднанні елементів (рис.5, а)

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{екв}} &= R_1 + R_2 + \dots + R_n; \\ L_{\text{екв}} &= L_1 + L_2 + \dots + L_n; \\ \frac{1}{C_{\text{екв}}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \end{aligned} \right\}$$

Тим самим вихідна схема зводиться до вже розглянутої, що складається тільки з трьох елементів (рис.1) з параметрами, еквівалентними параметрам вихідних елементів. Подальший аналіз і розрахунок кола здійснюється відповідно зі співвідношеннями для кола з  $L$ ,  $C$  і  $R$ .

Якщо в колі задані активні і реактивні опори, то для послідовного з'єднання

$$\begin{aligned} R_{\text{екв}} &= R_1 + R_2 + \dots + R_n; \\ X_{\text{екв}} &= (X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln}) - (X_{C1} + X_{C2} + \dots + X_{Cn}) \end{aligned}$$

Подальший аналіз і розрахунок здійснюються з використанням трикутника опорів зі сторонами  $R_{\text{екв}}$ ,  $X_{\text{екв}}$ ,  $Z$ .

**3. Використання векторної діаграми для аналізу послідовного кола.**

Аналіз послідовних кіл і розподілу напруг на їхніх елементах проводиться по векторній топографічній діаграмі напруг.

За вихідний вектор при побудові топографічної діаграми звичайно приймається вектор струму, що є загальним для всіх елементів. Оскільки початкова фаза однієї величини (струму чи напруги) може бути прийнята довільною (бо сенс має тільки різниця їхніх фаз), то звичайно рівною нулю приймається початкова фаза струму. Побудування діаграми покажемо на прикладі.

### **Приклад.**

Побудувати векторну діаграму напруг у колі з послідовним з'єднанням двох котушок індуктивності, що характеризуються параметрами  $R_{k1}$ ,  $L_{k1}$  і  $R_{k2}$ ,  $L_{k2}$ , двох конденсаторів з ємностями  $C_1$  і  $C_2$  і резистора з опором  $R$  (рис.5,а), якщо відомі струм у колі  $I$  і всі активні і реактивні опори кола.

### Рішення.

1) Оскільки початкова фаза струму не задана, то приймаємо  $\psi_i=0$  і в масштабі будуємо горизонтальний вектор струму  $I$  (рис.5,б);

2) далі визначаємо величину  $U_{Rk1}=I \cdot R_{k1}$  і від початкової точки  $a$  відкладаємо вектор, колінеарний вектору  $I$ , довжиною  $|U_{Rk1}|$  у відповідному масштабі;

3) потім знаходимо величину  $U_{Lk1}=I \cdot X_{Lk1}$  і від кінця вектора  $U_{Rk1}$  відкладаємо вектор довжиною  $|U_{Lk1}|$ , що напрямлений відносно вектора струму під кутом  $+90^\circ$  (проти годинникової стрілки);

4) визначаємо величину  $U_{C1}=I \cdot X_{C1}$  і від кінця вектора  $U_{Lk1}$  відкладаємо вектор  $U_{C1}$ , що відстає від вектора струму на кут  $90^\circ$ , тобто напрямлений відносно вектора струму під кутом  $-90^\circ$  (за годинниковою стрілкою);

5) від кінця вектора  $U_{C1}$  відкладаємо вектор довжиною (в масштабі)  $U_R$ , що співпадає за напрямком з вектором струму (тобто паралельний йому і з таким же напрямком);

і так далі..

Обійшовши весь контур від точки  $a$  до точки  $e$ , вхідну напругу  $U$  (тобто *повну напругу всього кола*) можна визначити по векторній діаграмі як модуль (довжину) вектора напруги, що з'єднує точки  $a$  й  $e$ , тому що вектор вхідної напруги за другим законом Кірхгофа

$$\overset{U}{U} = \overset{U}{U}_{Rk1} + \overset{U}{U}_{L1} + \overset{U}{U}_{C1} + \overset{U}{U}_R + \overset{U}{U}_{C2} + \overset{U}{U}_{Rk2} + \overset{U}{U}_{L2}$$

Очевидно, що, вимірявши вольтметром напругу на затискачах  $(a,e)$ , одержимо таку ж величину.

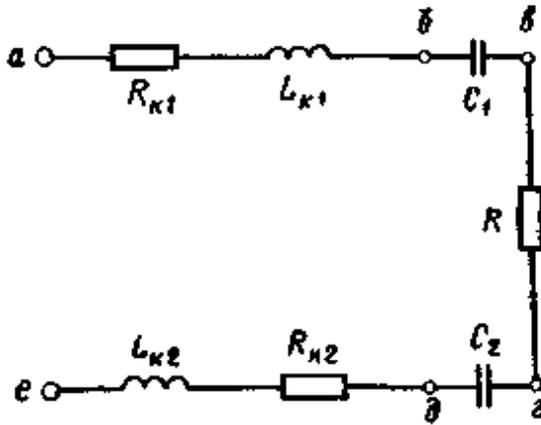


Рис.3.3.5,а

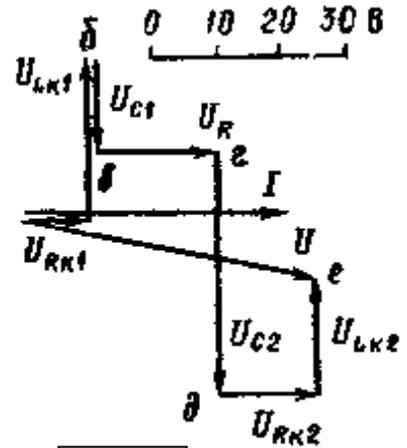


Рис.3.3.5, б

вер

німо увагу, що вектори напруг можна було відкладати і в іншому порядку, не змінивши при цьому суті діаграми, оскільки зміна місць доданків не змінює величину суми (як алгебраїчної, так і векторної).

Векторна діаграма дозволяє розрахувати напруги між будь-якими двома точками кола, зсуви фаз між напругою і струмом на будь-якій його ділянці і провести аналіз режиму роботи як всього кола, так і окремих його елементів.

Для розрахунку кіл синусоїдного струму застосовується також один із символічних методів – **метод комплексних величин**, основа якого полягає в тому, що будь-який вектор на площині, що відповідає періодичній гармонічній функції, можна уявити комплексною величиною. При цьому операції над вихідними функціями (оригіналами) замінюються простішими операціями над їхніми **символами** (зображеннями).

Символічний метод дає змогу геометричні дії над векторами замінити алгебраїчними. Розрахунки кіл змінного струму символічним методом проводяться у такий же спосіб, що й кіл постійного струму (тобто, із застосуванням тих самих формул і виразів основних законів електричних кіл).

Комплексне число можна уявити точкою на комплексній площині.

Комплексні величини мають такі форми запису:

алгебраїчна

$$\underline{A} = A' + jA'';$$

$$\underline{A} = \text{Re } \underline{A} + j \text{Im } \underline{A};$$

тригонометрична

$$\underline{A} = A \cdot \cos \alpha + jA \cdot \sin \alpha ;$$

показникова

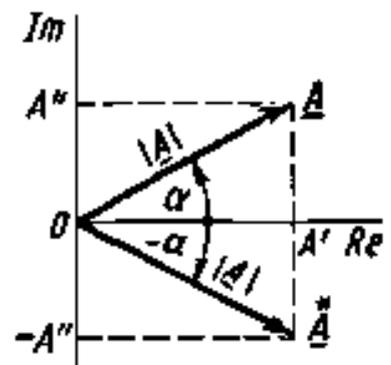
$$\underline{A} = A e^{j\alpha};$$

$$\underline{A} = |\underline{A}| e^{j\alpha};$$

(останнє випливає з формули Ейлера

$$A \cdot \cos \alpha + jA \cdot \sin \alpha = A e^{j\alpha}),$$

де  $\underline{A}$  – комплексна величина,



$A' = \operatorname{Re} A = A \cdot \cos \alpha$  – дійсна частина,

$A'' = \operatorname{Im} A = A \cdot \sin \alpha$  – уявна частина,

$A = |A|$  – модуль комплексної величини,

$\square$  – аргумент комплексної величини (кут між позитивною реальною віссю і відрізком  $OA$ ).

Символ  $j$  – це уявна одиниця:  $j = \sqrt{-1}$ .

Два комплексних числа називаються спряженими, якщо їх дійсні частини рівні, а уявні відрізняються лише знаком.

**Спряжена** комплексна величина зверху позначається зіркою, тобто:

$$\underline{A}^* = A' - jA'';$$

$$\underline{A}^* = \operatorname{Re} \underline{A} - j \operatorname{Im} \underline{A};$$

$$\underline{A}^* = A e^{-j\alpha};$$

$$\underline{A}^* = |A| e^{-j\alpha};$$

$$\underline{A} = A \cdot \cos \alpha - jA \cdot \sin \alpha$$

**Комплексні зображення гармонічних функцій часу.**

Кожній гармонічній функції часу  $a(t)$  – тобто, векторній величині – можна поставити у відповідність комплексне число:

$$\underline{a} = A_m \cdot \cos(\omega t + \psi) + jA_m \cdot \sin(\omega t + \psi) = A_m e^{j(\omega t + \psi)},$$

модуль якого дорівнює амплітуді гармонічної функції  $A_m$  (довжині вектора), а аргумент – її фази  $\theta = \omega t + \psi$ .

Комплексне число, модуль якого дорівнює амплітуді гармонічної функції  $A_m$ , а аргумент – її початковій фазі  $\psi$ , називають комплексною амплітудою гармонічної функції часу:  $\dot{\underline{A}}_m = A_m e^{j\psi}$ .

При розрахунках електричних кіл змінних гармонічних струмів (і напруг) використовуються комплексні зображення (символи) цих функцій. Оскільки усі струми і напруги в одному електричному колі мають однакову частоту, вся необхідна інформація (значення амплітуд та початкових фаз) міститься в комплексних амплітудах величин. Тому в якості символів гармонічних струмів і напруг для розрахунку кола використовують їх комплексні амплітуди. Замість амплітудного значення в практичних розрахунках частіше користуються діючими значеннями, але все інше залишається таким же, як і з амплітудами.

Для позначення комплексних електричних величин, що є синусоїдними функціями часу, застосовується основне позначення (діючої або амплітудної величини) з крапкою над ним. Наприклад, синусоїдні струм, напругу, магнітний потік (діючі значення) можна записати у вигляді комплексів (в різних формах):

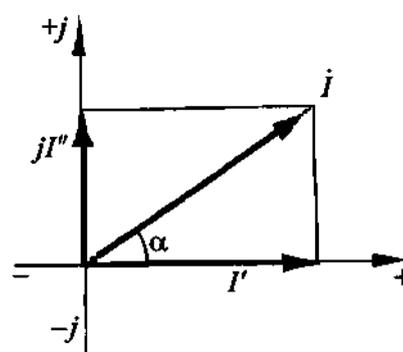
$$\begin{aligned} \dot{i} &= I e^{j\alpha}; \\ \dot{U} &= U \cos \alpha + jU \sin \alpha; \\ \dot{\Phi} &= \Phi' + j\Phi''. \end{aligned}$$

Значення опорів і провідностей в колі не є функціями часу (не векторні).

Величина потужності також не є векторною (тобто, потужності і опори не мають напрямку), а зміна значень потужності в часі зумовлена змінними струмом і напругою ( $S=U \cdot I$ ). Тому в символічному вигляді повні опір, провідність та потужність позначають власними літерними позначеннями, підкресленими ризкою. Наприклад: Z, Y, S.

Таким чином, при застосуванні символічного методу вектор (струму, напруги або е.р.с.) розглядається як величина комплексна на комплексній площині. Тому метод має також назву «метод комплексних величин».

Кожний вектор (наприклад,  $I$ ) розкладається на дві складові ( $I'$  та  $I''$ ) на осях прямокутної системи координат (рис.):  $\bar{I} = \bar{I}' + j\bar{I}''$



Вісь абсцис називають віссю дійсних значень та позначають знаками «+» та «-». Вісь ординат називають віссю уявних значень. Складову вектора за уявною віссю виділяють символом  $j$ .

Множення кожного вектора на символ  $j$  повертає цей вектор на  $90^\circ$  проти ходу годинної стрілки. Множення на  $j^2$  повертає вектор на  $180^\circ$  (наприклад:  $j^2 U = -U$ ). Тому символ  $j$  називають поворотним коефіцієнтом.

Отже, струм, заданий синусоїдною функцією часу  $i = I_m \sin(\omega t + \square)$ , можна представити вектором  $\bar{I}_m$ , або комплексним символом в одній з трьох форм:

для амплітудних значень

для діючих значень

$$\dot{I}_m = \text{Re} \left[ \dot{I}_m \right] + j \text{Im} \left[ \dot{I}_m \right] = I'_m + jI''_m,$$

$$\dot{I} = \text{Re} \left[ \dot{I} \right] + j \text{Im} \left[ \dot{I} \right] = I' + jI'',$$

$$\dot{I}_m = I_m (\cos \alpha + j \sin \alpha),$$

$$\dot{I} = I (\cos \alpha + j \sin \alpha),$$

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\alpha},$$

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\alpha},$$

$$\text{де } I_m = \sqrt{\text{Re} \left[ \dot{I}_m \right]^2 + \text{Im} \left[ \dot{I}_m \right]^2} = \sqrt{(I'_m)^2 + (I''_m)^2} \quad - \quad \text{модуль комплексної}$$

величини (амплітуда струму),

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} \left[ \dot{I}_m \right]}{\operatorname{Re} \left[ \dot{I}_m \right]} = \operatorname{arctg} \frac{I_m''}{I_m'} - \text{аргумент комплексної величини (початкова фаза}$$

струму)

Величину комплексного діючого  $\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}}$  називають **комплексним струмом**.

Аналогічно записуються комплекси інших синусоїдних (тобто, періодичних) функцій (електричних, магнітних тощо)

Комплексний запис **опору і провідності** визначається із закону Ома в символічній формі:

$$\dot{U} = \underline{Z} \cdot \dot{I} \quad (\text{закон Ома})$$

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

де  $Z$  – модуль комплексного числа (повний опір кола),

$\varphi = \psi_u - \psi_i$  – аргумент цього числа (різниця початкових фаз напруги і струму заданого кола або ділянки).

Це показникова форма запису комплексного символу опору.

При переході від показникової форми до алгебраїчної отримаємо:

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi} = Z \cos \varphi + j Z \sin \varphi = R + jX, \quad \text{оскільки } R = Z \cos \varphi, \quad X = Z \sin \varphi.$$

Таким чином, **активний опір  $R$**  заданої ділянки (або всього кола) є **дійсною складовою повного опору** цієї ділянки (або всього кола), а **реактивний опір  $X$**  – його уявною складовою.

Видно, що  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  як модуль комплексного числа, а  $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$  як його аргумент. Знак реактивного опору визначатиме знак аргументу. Основні значення аргументу лежать в інтервалі кутів  $[-\pi/2; \pi/2]$ . При розрахунках він може приймати й інші значення від 0 до  $\pm 2\pi$ .

Між провідністю  $Y$  і опором  $Z$  однієї й тієї ж ділянки мають місце співвідношення у символічному вигляді:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X}{Z^2} = g - jb,$$

( $g$  – активна провідність,  $b$  – реактивна провідність)

$$\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{1}{g - jb} = \frac{g}{g^2 + b^2} + j \frac{b}{g^2 + b^2} = \frac{g}{Y^2} + j \frac{b}{Y^2} = R + jX.$$

Повний опір  $Z$  називають **імпедансом** електричного кола.

Активний опір  $R$  називають *резистансом*, реактивний  $X$  – *реактансом*. Реактанс буває *індуктивним* (індуктивний опір) та *ємнісним* (ємнісний опір).

Повну провідність  $Y$  називають *адмітансом* електричного кола.

Активну провідність  $g$  називають *кондуктансом*, реактивну  $b$  – *сусцептансом*.

Сусцептанс буває *індуктивним* (індуктивна провідність) та *ємнісним* (ємнісна провідність).

**Потужність у символічному вигляді** визначається добутком комплексу напруги та спряженого комплексу струму, тобто  $\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^*$

Якщо  $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$ ,  $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$ ,  $\dot{I}^* = Ie^{-j\psi_i}$ , а  $\varphi = \psi_u - \psi_i$  (зсув фаз), то

$$\underline{S} = UIe^{j\varphi}$$

Це вираз повної потужності у показниковій формі.

Можна потужність визначити в алгебраїчній та тригонометричній формах:

$$\underline{S} = S \cos \varphi + jS \sin \varphi,$$

$$\underline{S} = P + jQ,$$

де  $S = UI$  – модуль повної потужності,  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

$P$  – активна потужність,  $P = S \cdot \cos \varphi$ ;

$Q$  – реактивна потужність,  $Q = S \cdot \sin \varphi$ .

Таким чином, повна потужність є величина комплексна. Активна потужність є дійсною частиною повної потужності, реактивна – уявною частиною повної потужності.

**Увага!** Співпадання дійсної складової з активною та уявної з реактивною має місце тільки для неекторних величин (опору, провідності, потужності), величини яких є результатом множення або ділення векторних величин. Для векторних величин (струму, напруги, е.р.с.) такого співпадання не існує.

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

$$S = \sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q_L - \sum Q_C)^2}.$$

**Баланс потужностей** в колі можна визначити рівнянням  $S_{\text{джер}} = S_{\text{прийм}}$ ,

де  $S_{\text{джер}}$  – потужність усіх джерел живлення,  $S_{\text{прийм}}$  – потужність усіх приймачів кола,

тобто 
$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_k \dot{I}_k^* = \sum_{k=1}^m I_k^2 \underline{Z}_k$$

Треба пам'ятати, що добуток  $\dot{U}_k \dot{I}_k^*$  береться зі знаком « $\rightarrow$ », коли напруга та струм джерела протилежні (струм збігається за напрямком з е.р.с.). Якщо

джерело працює у режимі приймача (струм та напруга збігаються за напрямком, а струм і е.р.с. – протинапрямлені), добуток  $\dot{U}_k I_k^*$  треба брати додатним.

Внутрішній опір джерела живлення вважають звичайним приймачем електричної енергії.

## Лекція № 10

Тема: **Перехідні процеси в колах з ємністю.**

### План

- 1) Основні поняття
  - (а) поняття усталеного (примушеного) режиму в колі;
  - (б) поняття перехідного режиму;
  - (в) закони комутації;
  - (г) математична модель струму і напруги перехідного режиму (дві складові).
- 2) Зарядка конденсатора (включення кола з ємністю й опором на постійну напругу):
  - (а) струм перехідного режиму (фізичні основи процесу, схема підключення, функція струму, графік струму);
  - (б) стала часу (поняття і формула обчислення);
  - (в) напруга на ємності в перехідному режимі (функція та її аналіз, графік);
  - (г) напруга на опорі в колі при перехідному режимі (функція та її аналіз, графік).
- 3) Розрядка конденсатора:
  - (а) фізичні процеси при відключенні зарядженої ємності від джерела (схема підключення для розрядки);
  - (б) струм перехідного режиму (функція струму, графік струму);
  - (в) стала часу (поняття і формула обчислення);
  - (г) напруга на ємності в перехідному режимі (функція та її аналіз, графік);
  - (д) напруга на опорі в колі при перехідному режимі (функція та її аналіз, графік).
- 4) Розв'язування задач.

**2.1. Закони комутації** .Дотепер ми розглядали в основному усталені процеси в електричних колах, коли напруги, струми і е.р.с. протягом тривалого проміжку часу залишалися *постійними чи змінювалися періодично*. Такий режим кола встановлюється при досить тривалій дії джерел постійної чи синусоїдальної е.р.с. і тому називається ще примушеним режимом. Примушений режим встановлюється в колі не миттєво слідом за моментом

включення чи відключення джерел живлення або за моментом зміни її параметрів ( $L$ ,  $C$  або  $R$ ), тобто за моментом комутації.

З моменту **комутації** в колі спостерігається *перехідний режим*, що тільки через досить великий інтервал часу (теоретично нескінченно великий) змінюється примушеним режимом.

Перший закон комутації: *струм у колі з індуктивністю не може змінюватися стрибком або, інакше, струм у момент, що безпосередньо іде за комутацією, має те ж значення, що він мав у момент, що безпосередньо передує комутації.*

Другий закон комутації: *напруга на ємності не може змінюватися стрибком або, інакше, напруга на ємності в момент, що безпосередньо іде за комутацією, має те ж значення, що й у момент, що безпосередньо передує комутації.*

Вивчення перехідних процесів у лінійних колах спрощується, якщо перехідний режим розглядати як результат накладення двох процесів (математична модель процесу). Першого – нового примушеного режиму, вважаючи, що він настає миттєво після комутації, і другого – вільного режиму, що забезпечує перехід кола від колишнього примушеного режиму до нового примушеного режиму.

Закон зміни вільного струму (напруги) визначається схемою кола і величинами її параметрів.

Дійсний струм у колі протягом перехідного режиму можна представити у вигляді суми нового примушеного струму і вільного струму:  $i = i_{np} + i_v$

напруга протягом перехідного режиму  $u = u_{np} + u_v$

## 2.2. Перехідні процеси в колах з ємністю

**Зарядка конденсатора. (Включення кола з ємністю й опором на постійну напругу)**

Приєднаємо незаряджений конденсатор з ємністю  $C$  через резистор з опором  $R$  до джерела живлення з постійною напругою  $U$ .

Напруга на затискачах конденсатора пропорційна заряду на його пластинах і оскільки конденсатор не був зарядженим, то за законом комутації напруга на конденсаторі в момент його включення ( $t=0$ ) дорівнює нулю, тобто  $U_C(0) = 0$ .

Після закінчення процесу зарядки (у сталому режимі) напруга на конденсаторі дорівнює напрузі джерела живлення, тобто її примушена складова  $U_{Cnp} = U$ .

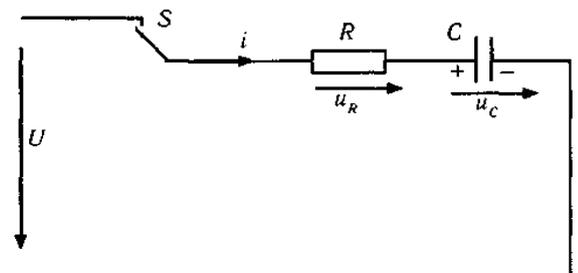


Рис.

Під час перехідного процесу напруга на конденсаторі складається з двох складових: напруги примушеного режиму  $U_{Cnp}=U$  і напруги вільного режиму

$$u_c = -Ue^{\frac{-t}{\tau}}.$$

Таким чином, напруга на конденсаторі при зарядці

$$u_c = U - Ue^{\frac{-t}{\tau}} = U(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}),$$

тобто, вона дорівнює різниці постійної напруги  $U$  джерела живлення і вільної напруги, що зменшується з перебігом часу за законом показової функції від значення  $U$  до нуля.

Параметр  $\tau$  називається **сталюю часу** кола і визначається параметрами кола:

$$\tau = CR$$

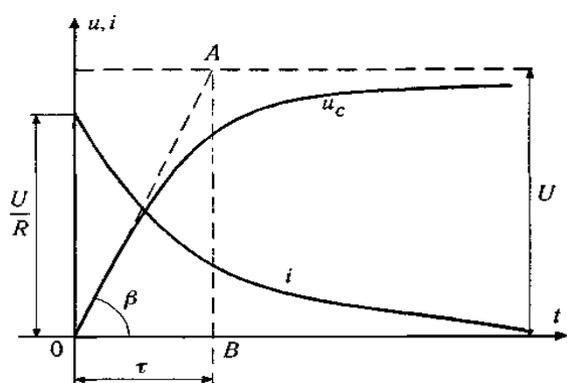


Рис.

Струм перехідного режиму, або зарядний струм:

$$i = C \frac{dU_c}{dt} = C \frac{1}{\tau} U e^{\frac{-t}{\tau}} = I e^{\frac{-t}{\tau}},$$

$$\text{де } I = \frac{CU}{\tau} = \frac{U}{R}.$$

Струм  $i$  від початкового значення  $I$  з часом поступово зменшується за законом показової функції практично до нуля.

За час  $t = \tau$  зарядний струм зменшується в 2,72 рази (тобто до значення  $i=0,37 \cdot I$ ), а напруга на конденсаторі за той же час зростає від нуля до  $0,63 \cdot U$  (див. графік рис.2.2.2.).

За час  $t = 3\tau$  струм зменшується до  $0,05 \cdot I$ , а напруга на конденсаторі збільшується до  $0,95U$ .

Через час  $t = 5\tau$  зарядка конденсатора практично закінчується.

Спад напруги на опорі R пропорційний струму:

$$u_R = R \cdot i = R \cdot I e^{\frac{-t}{\tau}} = U e^{\frac{-t}{\tau}}$$

**Розрядка конденсатора.**

При відключенні конденсатора від джерела заряд на ньому зберігається.

А при замиканні накоротко відбувається процес розрядки конденсатора.

Струм у колі при цьому спрямований протилежно струму зарядки:  $i = -u_c / R$

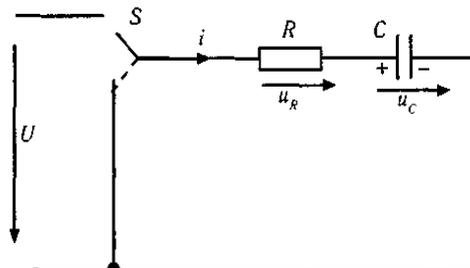


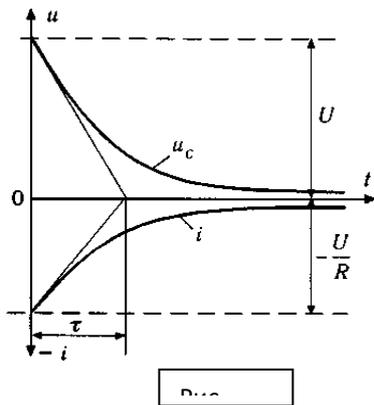
Рис.

Напруга на конденсаторі в початковий момент має найбільше значення, а потім змінюється за законом показової функції

$$u = Ue^{-\frac{t}{\tau}},$$

досягаючи за час  $t = 5\tau$  практично нульового значення (графік – на рис 2.2.4).

Струм розрядки в початковий момент ( $t = 0$ ) стрибком змінюється від нуля до значення  $-U/R$ , а потім змінюється пропорційно напрузі на конденсаторі:



$$i = Ie^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Швидкість протікання процесу, як і раніш, визначається **сталой часу  $\tau$**

Процес розрядки вважається закінченим через час  $t = 5\tau$

Вся енергія електричного поля зарядженого конденсатора за час розряду перетворюється на тепло в резисторі R.

### Включення кола з індуктивністю й опором на постійну напругу

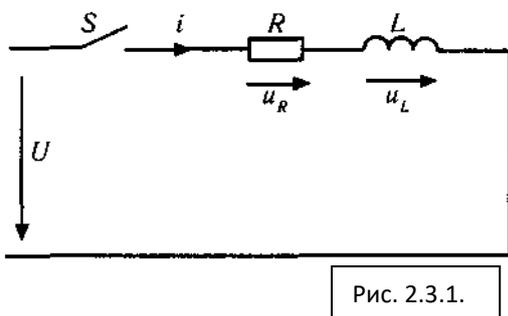


Рис. 2.3.1.

При включенні кола з індуктивністю  $L$  і опором  $R$  на постійну напругу  $U$  струм у колі  $i$  внаслідок дії е.р.с. самоіндукції наростає поступово від нуля до примушеного (усталеного) значення  $i = \frac{U}{R} = I$  за експоненціальним законом,

що характеризується вільною

складовою струму:

$$i_g = -I^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

Струм перехідного режиму  $i = i_{np} + i_g = I - I^{-\frac{t}{\tau}} = I(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$

У початковий момент часу ( $t = 0$ ) вільний струм, рівний по величині і зворотний за знаком примушеному струму, компенсує примушений струм, так що струм перехідного режиму дорівнює нулю.

Потім, вільний струм зменшується за законом показової функції, а перехідний струм збільшується. Нарешті, при  $t = \infty$

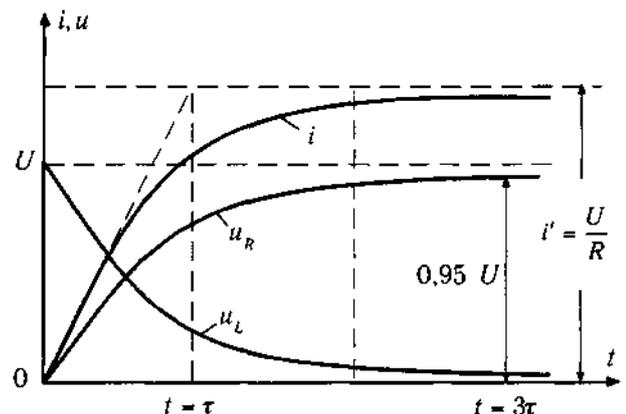


Рис. 2.3.2.

струм досягає примушеного значення  $I = U/R$ .

Теоретично струм досягне сталого значення через нескінченно великий час. А практично часто сталий режим настає дуже швидко.

Про тривалість перехідного процесу судять за величиною, що називають **сталою часу**:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Дійсно, через проміжок часу  $t = \tau$  струм в колі змінюється за законом  $i_{(t=\tau)} = I(1 - e^{-1}) = I(1 - \frac{1}{e}) \approx 0,63 \cdot I$ , тобто зростає від нуля до 63% від значення усталеного струму  $I$ .

Через час  $t = 3\tau$  величина струму в цьому колі  $i_{(t=3\tau)} = I(1 - e^{-3}) = I(1 - \frac{1}{e^3}) \approx 0,95 \cdot I$ , тобто досягає 95% від струму примушеного режиму.

Вважаючи закінчення перехідного процесу при струмі  $i$ , що відрізняється на 1% від струму примушеного режиму  $I$ , одержуємо **тривалість перехідного режиму**  $t_{\text{перех}} = 4,6\tau$  так що при малій індуктивності кола (величина  $\tau = L/R$  мала) примушений режим може наступити через частки секунди і навіть мілісекунди.

Напруга на активному опорі при перехідному процесі

$$u_R = iR = I(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})R = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Напруга на індуктивності при перехідному процесі

$$u_L = U - u_R = U - U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Електрорушійна сила самоіндукції при перехідному процесі

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = -I R e^{-\frac{t}{\tau}} = -U e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Електрорушійна сила самоіндукції дорівнює по величині і зворотна за знаком напрузі на індуктивності. У початковий момент вона має найбільше значення, рівне напрузі на затискачах кола  $U$ , і з ростом струму спадає до нульового значення.

**Відключення кола з індуктивністю й опором**

Перехідний процес відключення нерозгалуженого кола протікає складніше, ніж при її включенні.

При відключенні кола контакти рубильника розходяться й у коло послідовно включається опір повітряного проміжку між контактами рубильника, що відходять один від одного. Якщо припустити, що провідність

повітря дуже мала, то струм у такому колі повинен майже миттєво зменшитися до нуля й у колі виникне дуже велика е.р.с. самоіндукції. Ця е.р.с. викликає між розбіжними контактами рубильника сильне електричне поле, так що відбудеться іонізація повітря, можливо навіть викидання з поверхні контактів рубильника вільних електронів (явище автоемісії); у повітряному проміжку виникне іскровий або дуговий розряд.

Таким чином, газовий проміжок між розбіжними контактами рубильника при відключенні кола має провідність і **струм у колі зменшується до нуля не миттєво**. Опір газового проміжку між контактами пристрою, що вимикає, - нелінійний; тому аналіз перехідного процесу при відключенні досить складний.

Варто пам'ятати, що відключення кіл, по яких проходять значні струми (сотні, тисячі амперів і більш), протікає дуже важко для апаратури вмикання та перемикавання. Для розриву таких кіл застосовуються спеціальні пристрої вмикання, що не руйнуються від дугового розряду і забезпечують швидке його гасіння і розрив кола струму.

## Лекція № 11

**Тема: Електричні вимірювання. Вимірювання електричних величин.**

### План

1. Поняття "вимірювання" та "електровимірювальні прилади"
2. Класифікація електровимірювальних приладів:
  - 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.
3. Вимірювання струмів, напруг, потужностей та енергії:
  - а) способи підключення приладів при вимірюванні струмів, напруг, потужностей та енергії;
  - б) способи розширення меж вимірювання амперметрів та вольтметрів.

### **Поняття "вимірювання" та "електровимірювальні прилади"**

***Вимірювання** – це процес порівняння фізичної величини з її значенням, прийнятим за одиницю.*

**Електровимірювальні прилади** – це такі технічні засоби, які виробляють сигнали вимірювальної інформації у формі, що доступна для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Електровимірювальні прилади дають змогу вимірювати як електричні, так і неелектричні величини. На шкалі наводиться назва приладу або початкова латинська літера одиниці, що вимірюється.

**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.

**1. Класифікація електровимірювальних приладів**

2.1. *За вимірювальною величиною електровимірювальні прилади поділяються на:*

- вольтметри (позначаються літерою  $V$ );
- амперметри ( $A$ );
- ватметри ( $W$ );
- омметри ( $\Omega$ );
- лічильники енергії ( $Wh$ );
- фазометри ( $\phi$ );
- частотоміри ( $Hz$ ) тощо.

До умовної літери може бути додано позначення кратності основної одиниці, наприклад: міліамперметр –  $mA$ ; кіловольтметр –  $kV$ ; мегомметр –  $M\Omega$  тощо.

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

- |                     |   |   |                        |
|---------------------|---|---|------------------------|
| а)                  |   |  | магнітоелектрична ---- |
| б) електромагнітна  |  |   | ---                    |
| в)                  |   |  | електродинамічна ----  |
| г) феродинамічна    |  |   | --                     |
| д) індукційна ----- |   |  |                        |
| е) електростатична  |  |   | ---                    |
| є) вібраційна ----- |   |  | ---                    |

тощо.

2.3. 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.

2.4. **За класом точності** електровимірювальні прилади класифікуються відповідно до стандартів. 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.

2.5. **За типом відлікового пристрою** електровимірювальні прилади розрізняються. В залежності від призначення прилади можуть бути:

- показуючі;
- реєструючі;
- самопишучі;
- друкуючі;
- інтегруючі;
- підсумовуючі.

Більш поширені показуючі прилади, тобто прилади безпосередньої оцінки. Відліковий пристрій цих приладів складається звичайно з шкали і показника. Показчиком може бути стрілка або світлова пляма з ризикою. Треба знати правила користування відліковим пристроєм. Такі показуючі прилади називаються **аналоговими**. Показання таких приладів – це безперервна функція величини, що вимірюється.

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

2.6. **У залежності від умов експлуатації, діапазону робочих температур та відносної вологості**, електровимірювальні прилади поділяються на п'ять груп:

- група А (температура +10...+35°C, вологість 80);
- група Б (температура -30...+40°C, вологість 90);
- група Б<sub>1</sub> (температура -40...+50°C, вологість 95);
- група В<sub>2</sub> (температура -50...+60°C, вологість 95);
- група В<sub>3</sub> (температура -50...+80°C, вологість 98).

2.7. **За стійкістю до механічних впливів** прилади підрозділяються в залежності від значення максимально допустимого прискорення при ударах та вібраціях (м/с<sup>2</sup>). За стандартом електровимірювальні прилади поділяються на групи:

- звичайні з підвищеною міцністю (ОП);
- нечутливі до вібрацій (ВН);
- віброміцні (ВП);
- нечутливі до трясіння (ТН);

- трясінняміцні (ТП);
- удароміцні (У).

Звичайні прилади групи ОП витримують прискорення до  $15 \text{ м/с}^2$ . **За ступенем захисту від зовнішніх магнітних та електричних полів** прилади поділяються на I і II категорії. Від зовнішніх полів прилади захищаються екранами.

2.9. У більшості показуючих електровимірювальних приладів *рухома частина пристрою переміщується внаслідок дії обертаючого моменту*. *Обертаючий момент виникає внаслідок взаємодії магнітних або електричних полів та, до деякої міри, пропорційний вимірюваній величині*. У вимірювальному пристрою завжди є **протидіючий момент**, що створюється механічною або електромагнітною силою.

Для створення механічної протидії використовується звичайно спіральна пружина, іноді для більшої чутливості–підвіси або розтяжки.

Прилади, в котрих створюється електромагнітний протидіючий момент, називають **логометрами**

Таблиця 1.

**Позначення на шкалах приладу**

Зміст умовного позначення	Умовне позначення
Прилад постійного струму	—
Прилад постійного та змінного струму	
Прилад змінного струму	
Прилад трифазного струму	
Робоче положення шкали горизонтальне	
Робоче положення шкали вертикальне	
Прилад класу 0,5	0,5
Ізоляцію вимірювального кола відносно корпусу приладу випробувано напругою 2 кВ.	

### 3. Вимірювання струмів, напруг, потужностей та енергії

3.1. Для **вимірювання струму** будь-якої вітки електричного кола амперметр вмикають послідовно з елементами кола (рис.5.1). В колах постійного струму звичайно застосовуються прилади магнітоелектричної системи і нечасто – електромагнітної системи. Для зменшення похибки вимірювання треба, щоб опір амперметра був значно меншим (на два порядки) за опір елемента вітки, в котрій вимірюється струм.

**Для вимірювання напруги** вольтметр вмикають паралельно до елемента, напругу на якому треба визначити (рис.5.1). В колах постійного струму звичайно користуються приладами магнітоелектричної системи. Для

зменшення похибки вимірювання опір вольтметра повинен бути великим (на два порядки більшим за опір елемента, на якому вимірюється напруга).

**Потужність** у колі постійного струму обчислюється за показаннями амперметра і вольтметра  $P = UI$

У випадках, коли немає змоги виміряти водночас напругу і струм, вимірюють потужність електродинамічним ватметром (рис.5.1).

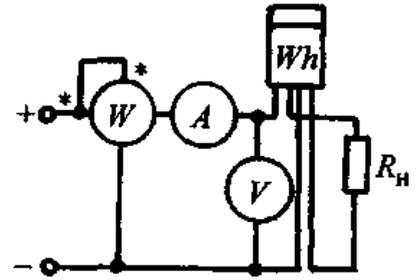


Рис.5.1.

**Енергію** в колах постійного струму вимірюють звичайно електродинамічним лічильником.

Схему вмикання вимірювальних приладів в коло постійного струму наведено на рис. 5.1.

**3.2. Для розширення меж вимірювання амперметра** використовують шунти (рис. 5.2).

Якщо  $I_A$  – максимально допустимий струм амперметра,

то можна записати  $I_A R_A = I_{ш} R_{ш}$ , тоді  $I_{ш} = \frac{I_A R_A}{R_{ш}}$ .

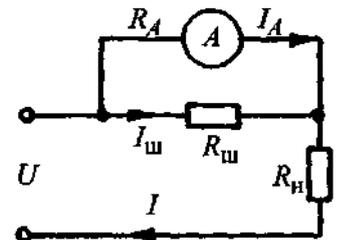


Рис.5.2.

За першим законом Кірхгофа  $I = I_A + I_{ш}$ , тобто  $\frac{I}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}}$ .

Відношення  $n = \frac{I}{I_A}$  називається коефіцієнтом розширення меж вимірювання амперметром. У цьому разі можна визначити опір шунта, котрий

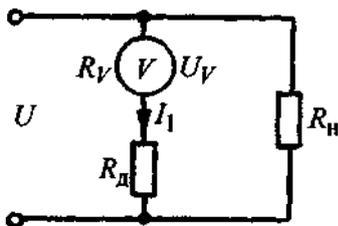


Рис.5.3.

забезпечує розширення меж з коефіцієнтом  $R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}$ .

**Для розширення меж вимірювання вольтметра** використовують додаткові опори, котрі вмикаються послідовно з обмоткою вольтметра (рис. 5.3).

Якщо  $U_V$  – максимально допустима напруга вольтметра,

$$U = I_1 R_V + I_1 R_d$$

Величина  $m = \frac{U}{U_V}$  називається коефіцієнтом розширення меж вимірювання

вольтметром. Тоді  $m = \frac{I_1}{U_V} (R_V + R_d)$ .

Оскільки  $\frac{U_V}{I_1} = R_V$ , можна визначити величину додаткового опору, котрий забезпечує розширення меж вимірювання вольтметра  $R_d = R_V (m - 1)$ .

## Лекція № 12

Тема: Електровимірювальні прилади деяких систем.

### План

1. Принцип дії, переваги та недоліки приладів магнітоелектричної системи.
2. Принцип дії, переваги та недоліки приладів електромагнітної системи.
3. Принцип дії, переваги та недоліки приладів електродинамічної системи.
4. Принцип дії, переваги та недоліки приладів феродинамічної системи.
5. Принцип дії, переваги та недоліки приладів індукційної системи.
6. Принцип дії, переваги та недоліки приладів електростатичної системи.
7. Особливості цифрових приладів.

1. У приладах *магнітоелектричної системи* обертаючий момент створюється внаслідок взаємодії сталого магніту з провідником зі струмом. Рухомою частиною може бути або рамка зі струмом, або сталий магніт, розташований на осі.

Прилади магнітоелектричної системи з рухомим магнітом є приладами низьких класів точності і застосовуються як вказівні на транспортних засобах тощо.

Електровимірювальні прилади з рухомою рамкою мають високу точність і застосовуються при більш точних вимірюваннях.

На рамку зі струмом у магнітному полі діє електромагнітна сила. Оскільки сила визначається за законом електромагнітної сили, то й обертаючий момент буде пропорційний струму, що протікає в рамці. Якщо протидіючий момент створюється пружиною

$$M_{np} = m\alpha,$$

то кут повороту рамки (стрілки приладу)  $\alpha$  пропорційний струму в рамці

$$\alpha = cI,$$

де  $m$  – питомий протидіючий момент,

$c$  – постійна величина.

Величина  $c = \alpha/I$  – називається чутливістю приладу і характеризує клас точності.

Оскільки кут повороту стрілки пропорційний струму, шкала приладів магнітоелектричної системи рівномірна, що є перевагою таких приладів. **Магнітоелектричні прилади застосовують для вимірювання постійних струмів та напруг.** Вони також можуть використовуватися для вимірювання опорів як гальванометри.

Позитивними особливостями приладів магнітоелектричної системи є високий клас точності (до 0,1) і порівняно малі внутрішні втрати енергії.

Недоліком приладів цієї системи можна вважати непридатність до роботи в полях змінного струму, чутливість до перевантажень і залежність від температури оточення.

Магнітоелектричним приладом можна виконувати вимірювання в полях змінного струму, якщо в коло рухомої котушки ввімкнути перетворювач змінного струму на постійний.

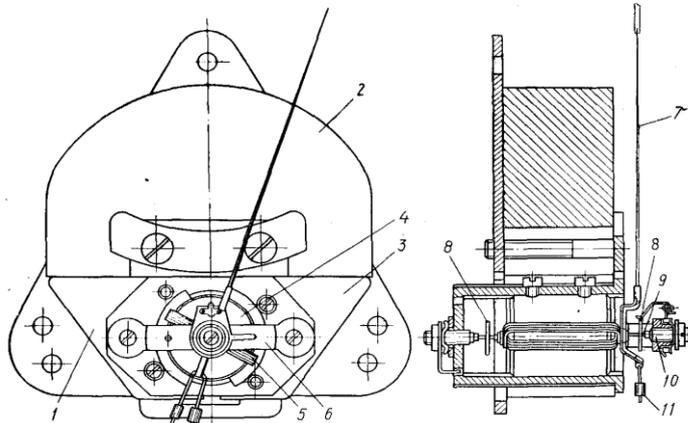


Рис. 8.1. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы.

2. Електровимірювальний прилад **електромагнітної системи** має нерухому котушку і розташовану на осі феромагнітну пластинку. Якщо в котушці протікає струм, що вимірюється, то створене котушкою поле втягує всередину феромагнітну пелюстку. Якщо вимірюється величина в полі постійного струму, то обертаючий момент пропорційний квадрату струму. Якщо в котушці протікає синусоїдний струм, то обертаючий момент пропорційний квадрату діючого значення цього струму

$$M_{об} = kI^2,$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

Кут відхилення рухомої частини також пропорційний квадратові струму

$$\alpha = cI^2.$$

Спеціальна форма феромагнітної пелюстки може трохи поліпшити нерівномірність. Створюють прилади, у котрих шкала нерівномірна тільки в початковій частині.

Квадратова пропорційність означає, що напрямок відхилення стрілки не залежить від напрямку струму, тобто **приладами електромагнітної системи можна вимірювати як в колах постійного, так і в колах змінного струму.**

Прилади електромагнітної системи можуть безпосередньо вимірювати значні струми (до 300 А) та напруги (до 600 В). Вимірювальний механізм амперметра на великий струм має котушку у вигляді одного витка мідної шини. Електромагнітний вольтметр на велику напругу має котушку з великою кількістю витків дроту малого перерізу з додатковими резисторами, котрі компенсують температурні похибки.

Точність електромагнітного приладу значно обмежується належністю феромагнітного осердя через явище залишкового намагнічування. Для зменшення впливу гістерезису (тобто підвищення класу точності приладу) осердя виготовляють зі спеціальних феромагнітних сплавів (наприклад, пермалоїв) з невеликою коерцитивною силою.

Такі прилади мають високий клас точності, до 0,2.

Основними *перевагами* приладів електромагнітної системи можна вважати:

- а) простоту, надійність, дешевизну;
- б) спроможність використання в колах постійного та змінного струму;
- в) високу перевантажувальну здатність.

До *недоліків* приладів електромагнітної системи відносять:

- а) невисоку точність;
- б) невисоку чутливість;
- в) велике власне споживання електроенергії (0,5... 15 Вт);
- г) обмежений частотний діапазон вимірювальних величин;
- д) нерівномірність шкали;
- е) чутливість до впливу зовнішніх магнітних полів.

Власне магнітне поле приладу дуже слабе, тому зовнішнє поле значно впливає на його показання. Для зменшення впливу зовнішнього поля вимірювальний механізм захищають сталевим екраном.

Значно менше впливає зовнішнє поле на прилади електромагнітної системи з астатичним вимірювальним механізмом.

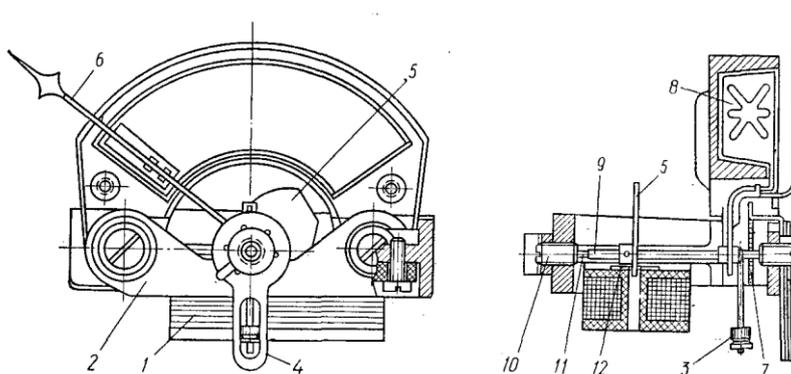


Рис. 8.2. Измерительный механизм электромагнитной системы.

*Астатичний вимірювальний механізм* має дві нерухомі обмотки та два осердя на одній осі. Обмотки вмикаються послідовно у такий спосіб, що їх потоки зустрічні, а моменти, що діють на осердя, – узгоджені. В цьому разі зовнішній магнітний потік підсилює обертаючий момент одного осердя і водночас послаблює момент другого осердя. Тому в астатичних електромагнітних приладах загальний обертаючий момент не залежить від зовнішнього магнітного поля.

Прилади електромагнітної системи застосовуються в промислових електротехнічних пристроях низької частоти та постійного струму, а також – досить широко – як щитові амперметри і вольтметри класів 1,0; 1,5; 2,0.

3. Прилади *електродинамічної системи* мають вимірювальний механізм, що складається з двох котушок: нерухомої і рухомої. Нерухома котушка має дві секції, всередині котрих на осі розташована рухома котушка. За наявності струму у котушках виникають електромагнітні сили взаємодії, що прагнуть повернути рухома котушку, тобто обертаючий момент пропорційний (для постійних струмів і відповідної конструкції механізму) добутку струмів:

$$M_{об} = k I_1 I_2.$$

Якщо прилад вмикається у коло синусоїдного струму, то обертаючий момент пропорційний добутку діючих значень струму і косинусу зсуву фаз між ними

$$M_{об} = k I_1 I_2 \cos \alpha.$$

*Електродинамічні прилади можна використовувати як амперметри, вольтметри та ватметри у колах постійного та змінного струмів.*

Протидіючий момент створюється двома пружинами, по котрих здійснюється й підвід струму до рухомої котушки. Підбираючи форми котушок та їх розташування, можна одержати майже лінійну шкалу вольтметрів і амперметрів, починаючи з 20% верхньої межі вимірювання.

Використовуючи електродинамічний прилад, котушки вмикають паралельно амперметру тому, що обмежене підведення великого струму до рухомої котушки через пружини. Обидві обмотки вмикаються через додаткові резистори.

При вимірюванні напруги обмотки вмикаються послідовно і також з додатковим резистором.

Якщо прилад використовується як ватметр, то нерухому обмотку вмикають послідовно, а рухома з додатковим резистором – паралельно до навантаження. Кут відхилення стрілки пропорційний потужності навантаження, тому шкала ватметрів електродинамічної системи завжди рівномірна. Напрямок відхилення рухомої частини залежить від відносного напрямку струму в котушках. Тому затискачі струмової обмотки і обмотки напруги, котрі вмикаються на джерело живлення, позначаються зіркою (\*). Ці затискачі називаються *генераторними*.

Прилади електродинамічної системи мають *переваги* над приладами інших систем:

- а) дуже високу точність (класи 0,1; 0,2; 0,5);
- б) можливість використання в колах постійного і змінного струму.

Висока точність цих приладів обумовлена тим, що магнітні потоки замикаються повітрям, а не в феромагнітних осердях, тобто виключається

вплив та похибки явища гістерезису, вихрових струмів тощо. Тому прилади електродинамічної системи у вигляді переносних широко застосовуються в точних лабораторних дослідженнях.

Основними **недопiками** приладів електродинамічної системи вважають:

а) залежність показання від впливу зовнішніх магнітних полів через слабе власне магнітне поле;

б) слабку перевантажувальну спроможність через обмеження струмопiводу до рухомої котушки;

в) значну споживану потужність;

г) незначний обертаючий момент.

4. Для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів та з метою підвищення обертаючого моменту в приладах **феродинамічної системи** застосовується феромагнітне осердя. Нерухома котушка цих приладів розташована на сталевому магнітопроводі. Прилад створює потужний магнітний потік, що захищає його від впливу зовнішніх полів і підвищує обертаючий момент.

Вимірювальні прилади феродинамічної системи мають порівняно низьку точність вимірювання і обмежений діапазон частот. Прилади цієї системи використовують в основному як щитові в колах змінного струму. Великий обертаючий момент дає змогу використовувати феродинамічні системи в самописних приладах у колах з частотою від 10 до 1500 Гц.

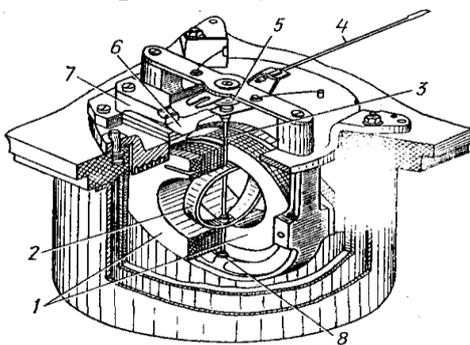


Рис. 8.3. Измерительный механизм электродинамической системы.

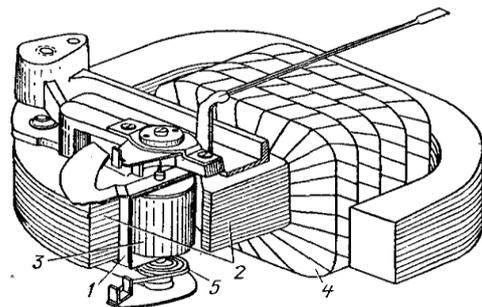


Рис. 8.4. Измерительный механизм феродинамической системы.

5. Принципово прилади **індукційної системи** можна зробити будь-якого призначення (амперметри, вольтметри, ватметри тощо). Але найбільшого розповсюдження **набули індукційні лічильники електричної енергії**.

Індукційний лічильник – це маленький двигун змінного струму. Принцип дії ґрунтується на взаємодії обертового (або біжучого) магнітного поля з вихровими струмами у рухомій частині приладу.

Біжуче поле створюється двома магнітними потоками, що зсунуті на деякий кут за фазою. Ці потоки створюються двома електромагнітами. Обмотка одного електромагніту (з великою кількістю витків) увімкнена паралельно навантаженню. Обмотка другого має малу кількість витків і вмикається

послідовно щодо навантаження, тобто один потік пропорційний напрузі, а другий – струму навантаження. Створюється обертаючий момент, що пропорційний потужності змінного струму

$$M_{06} = kP$$

Протидіючий момент створюється сталім магнітом, в полі котрого обертається рухома частина – алюмінієвий диск. Взаємодія сталого магнітного потоку з вихровими струмами зумовлює гальмівний момент  $M_{\Gamma}$ .

При сталій частоті обертання  $M_{06} = M_{\Gamma}$ , а  $W = c n$ ,

де  $W$  – енергія, що споживається навантаженням,

$n$  – кількість обертів лічильника,

$c$  – сталий коефіцієнт (стала лічильника показує кількість кіловат-годин електроенергії, що відповідає одному оберту диска).

**Перевагами** приладів індукційної системи можна вважати:

- а) порівняно великий обертаючий момент;
- б) стійкість до значних перевантажень (по струму до 300%);
- в) незалежність від зовнішніх магнітних полів.

Взагалі лічильники індукційної системи дуже надійні в експлуатації. Вони випускаються промисловістю класів 1,0; 2,0; 2,5 (лічильники активної енергії) і 2,0; 3,0 (лічильники реактивної енергії). Бувають лічильники однофазні і трифазні.

До **недоліків** приладів цієї системи можна віднести те, що лічильники індукційної системи використовуються для змінного струму лише однієї частоти. Показання приладів цієї системи залежать значною мірою від температури оточуючого середовища.

Для розширення меж вимірювання енергії змінного струму за напругою і струмом використовують вимірювальні трансформатори напруги і струму.

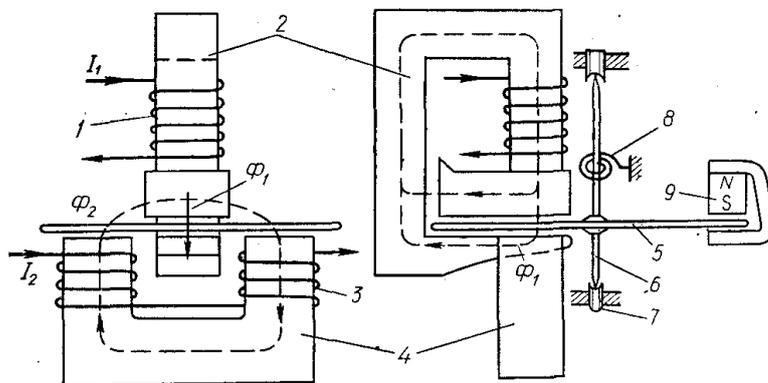


Рис. 8.5. Измерительный механизм индукционной системы.

6. Вимірювальний механізм приладу **електростатичної системи** складається з металевих ізольованих пластин. Під дією потенціалу рухома пластина відхиляється, тобто створюється обертаючий момент

$$M_{06} = cU^2,$$

що пропорційний квадрату постійної напруги, або квадрату діючого значення синусоїдної напруги.

Підбиранням форми і розмірів пластин можна отримати рівномірну шкалу.

Прилади електростатичної системи використовуються тільки як вольтметри постійної і змінної напруги.

До *переваг* електростатичних вольтметрів можна віднести:

- а) мале власне споживання електричної енергії;
- б) нечутливість до зовнішніх магнітних полів та коливань температури;
- в) можливість вимірювати високі напруги без застосування вимірювальних трансформаторів напруги.

До *недоліків* приладів цієї системи можна віднести порівняно низьку чутливість приладів.

Для розширення меж вимірювання електростатичними вольтметрами застосовують ємнісні та резистивні подільники напруги.

**7. Цифрові прилади** вимірюють значення безперервної електричної величини в окремі моменти часу. Результат вимірювання подається в цифровій формі.

Промисловість виготовляє цифрові вольтметри постійної напруги від 1 мкВ до 1000 В. Завдяки застосуванню каліброваних шунтів ці прилади можна використовувати як цифрові амперметри до 7500 А, крім того, як вольтметри змінної напруги, частотомери, омметри тощо.

**Переваги:**

Ці прилади мають дуже велику точність вимірювання (похибки від 0,1 до 1%), велику швидкодію, широкі межі вимірювань. Цифрові прилади можна комутувати з обчислювальними машинами.

До *недоліків* цифрових приладів треба віднести їх високу вартість та порівняну складність.

## Лекція № 13

Тема: **Класифікація машин. Електричні машини постійного струму. Принцип дії машин постійного струму. Будова машин постійного струму**

### План

1. Призначення, принцип дії і класифікація електричних машин.
  2. Будова машин постійного струму.
  3. Типи і характеристики машин постійного струму.
  4. Спеціальні машини постійного струму.
- 1. Призначення, принцип дії і класифікація електричних матеріалів.**
- Електричні машини призначені для перетворення енергії. Механічну енергію на електричну перетворюють за допомогою електричних генераторів. Електричну ж енергію на механічну – за допомогою електричних двигунів. Машини для перетворення змінного струму на постійний і навпаки, а також

частоти або кількості фаз змінного струму називають *електромашинами перетворювачами*.

Принцип дії, будова і робота різних електричних машин ґрунтуються на використанні деяких фізичних явищ. Найважливіші з них – електромагнітна індукція і взаємодія магнітних (електромагнітних) полів. Ці явища ви вивчали на уроках фізики у 8-му класі. Згадайте такий дослід: провід, з'єднаний з чутливим вимірювальним приладом (гальванометром), переміщують між полюсами підковоподібного магніту, при цьому стрілка гальванометра відхиляється. Дослід показує, що в провіднику під час руху його в магнітному полі виникає електрорушійна сила (ЕРС). Її називають ЕРС електромагнітної індукції, або просто ЕРС індукції, а напрям цієї ЕРС визначають, як відомо з курсу фізики, користуючись правилом правої руки: долоню правої руки розміщують так, щоб лінії магнітної індукції входили в неї, а відігнутий під прямим кутом великий палець збігався з напрямом руху провідника, тоді витягнуті чотири пальці руки показують напрям ЕРС індукції.

ЕРС індукції виникає й тоді, коли провідник нерухомий, але міститься в змінному магнітному полі.

Отже, явище електромагнітної індукції полягає в тому, що в провідному контурі, який міститься в змінному магнітному полі або перетинає лінії магнітної індукції постійного магнітного поля, виникає електрорушійна сила індукції.

Згадаємо інший дослід: по проволу, розміщеному між полюсами підковоподібного магніту, пропускають електричний струм – провід переміщується перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Дослід показує, що на провід зі струмом у магнітному полі діє сила, напрям якої визначають, користуючись правилом лівої руки: долоню лівої руки розміщують так, щоб лінії магнітної індукції входили в неї, а чотири витягнуті пальці збігалися з напрямом струму в провіднику, тоді відігнутий під прямим кутом великий палець показує напрям сили, що діє на провідник. Сила діятиме на провід зі струмом і тоді, коли в досліді постійний підковоподібний магніт замінити електромагнітом. Проволу можна надати форми рамки; якщо рамку розмістити в магнітному полі і пропустити по ній струм, то вона повернеться навколо своєї осі.

Обертання рамки зумовлене тим, що на її сторони діють сили в протилежних напрямках. А такі сили, як відомо з фізики, створюють обертаючий момент. Розгляньте явище лежить в основі будови і роботи електричних двигунів, багатьох електричних приладів, апаратів. У кожному з розглянутих вище випадків і аналогічних до них (наприклад, коли струм проходить по двох паралельних проволу) виникнення сили можна пояснити взаємодією магнітних (електромагнітних) полів: магнітного поля постійного

підковоподібного магніту й магнітного поля, створюваного струмом, який проходить по провіднику; магнітного поля постійного підковоподібного магніту (або електромагніту) і магнітного поля, створюваного струмом, що проходить по рамці; магнітних полів, створюваних струмами, котрі проходять по кожному з паралельно розміщених проводів.

За видом струму розрізняють машини змінного струму і машини постійного струму.

Електричні машини змінного струму поділяють, крім того, на дві групи – синхронні й асинхронні. Щоб зрозуміти ознаки цієї класифікації, розглянемо будову електричних машин. Електрична машина має нерухому частину – статор і рухому – ротор (якір), нерухомо з'єднаний з валом машини. Кожна із цих частин може виконувати будь-яку з двох функцій: створювати або магнітне поле, або ЕРС індукції. Термін «ротор» звичайно вживають тоді, коли говорять про машини змінного струму, а термін «якір» – стосовно машин постійного струму. Кількість обертів ротора (вала машини) за одиницю часу називають *частотою обертання* електричної машини.

Магнітне поле, що його створює статор, у більшості електричних машин змінюється періодично; часто воно є обертовим магнітним полем. Якщо частота обертання магнітного поля і частота обертання вала електричної машини однакові, такі машини називають синхронними. В асинхронних машинах частота обертання ротора менша за частоту обертання магнітного поля.

Електричні машини експлуатують у різних умовах. А тому залежно від форми виконання розрізняють відкриті й захищені електричні машини, причому захищені можуть бути бризко-захищеними, водозахищеними, пилозахищеними, вибухоза-хищеними та ін.

Під час роботи електричні машини нагріваються. Це шкідливо для ізоляції та інших частин. Тому більшість електричних машин мають вентиляційні пристрої.

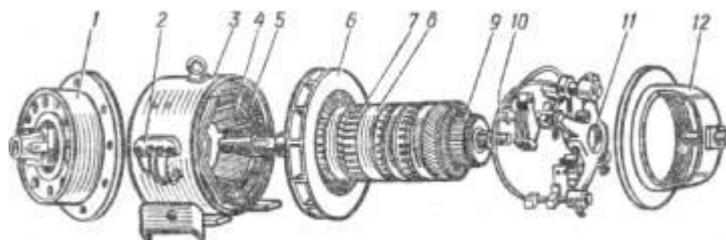
## **2. Будова машин постійного струму.**

Одна й та сама машина постійного струму в принципі може працювати і як генератор, і як двигун. (Ця властивість машини постійного струму, що називається *оборотністю*, дає змогу не розглядати окремо будову генератора чи двигуна.) Проте кожен електричний завод випускає з певним призначенням – працювати тільки як генератор або тільки як двигун. Дуже рідко використовують машини постійного струму, призначені для роботи як генератором, так і двигуном.

Генератори постійного струму застосовують тоді, коли потрібно мати самостійне джерело струму, наприклад для живлення деяких видів електромагнітів, електромагнітних муфт, електродвигунів, електролізних ванн, зварювальних установок тощо.

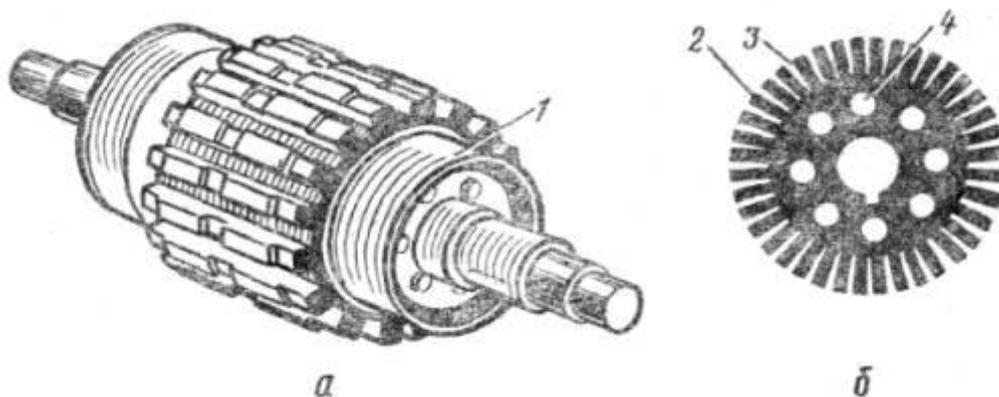
Електродвигуни постійного струму застосовують тоді, коли потрібно плавно регулювати швидкість, наприклад у тролейбусах, електровозах, деяких типах підйомних кранів, у пристроях автоматики.

Статор машини постійного струму складається зі *станини* (рис. 62) і *осердя*. Станину виготовляють з маловуглецевої сталі, яка має значну магнітну проникність. Тому станина є також і магнітопроводом. Одночасно це основна деталь, що об'єднує інші деталі й складальні одиниці машини в єдине ціле. Так, до станини із середини прикріплюють болтами *полюси*, котрі складаються з осердя, полюсного наконечника і котушки.



**Рис. 62. Будова машини постійного струму:**

1 – задній підшипниковий щит; 2 – затискачі; 3 – станина; 4 – головний полюс; 5 – обмотка головного полюса; 6 – вентилятор; 7 – обмотка якоря; 8 – осердя якоря; 9 – колектор; 10 – вал; 11 – траверса із щитковим механізмом; 12 – передній підшипниковий щит



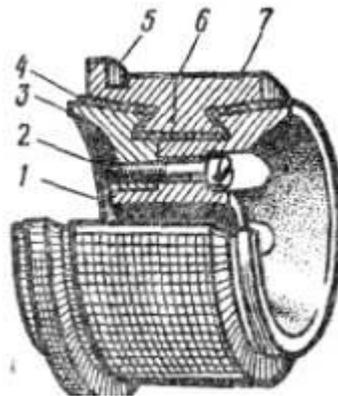
**Рис. 63. Якір машини постійного струму:**

а – якір без обмотки; б – сталевий лист осердя якоря; 1 – натискні шайби; 2 – зубець; 3 – паз; 4 – вентиляційний отвір

Розрізняють основні й додаткові полюси. Основні полюси збуджують магнітне поле; тому обмотки їх котушок називають обмотками збудження. Додаткові полюси встановлюють у машинах підвищеної потужності (понад 1 кВт) для поліпшення роботи машини; обмотку додаткових полюсів з'єднують послідовно з обмоткою ротора (якоря).

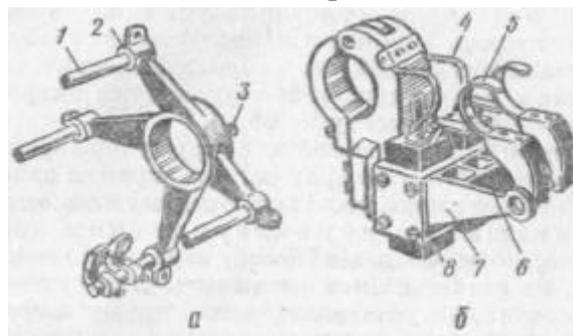
Ротор (якір) (рис. 63) машини постійного струму складається з осердя й обмотки. Осердя якоря набирають з тонких листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного лаковим покриттям, що зменшує втрати на вихрові

струми. У пази осердя вкладають обмотку якоря. В осерді якоря роблять вентиляційні канали. Щоб струм від обмотки якоря в зовнішнє коло (у генераторі) або із зовнішнього кола до обмотки якоря (у двигуні) проходив в одному й тому самому напрямі, у машині постійного струму встановлюють *колектор* (рис. 64). Набирають його з мідних пластин, ізольованих одна від одної міканітовими прокладками. Кожну пластину колектора з'єднують з одним або кількома витками обмотки якоря. Осердя якоря і колектор закріплюють на одному валу (див. рис. 62). Отже, колектор – це пристрій, який конструктивно об'єднаний з якорем (ротором) електричної машини і є механічним перетворювачем частоти. По ізольованих один від одного і приєднаних до витків обмотки якоря пластинах, що становлять колектор, ковзають струмознімні щітки (рис. 65). Через ці щітки й колектор обмотка якоря приєднується до зовнішнього електричного кола. Щітки вставляють в обойми щіткотримача і притискають до колектора пружинами.



**Рис. 64. Будова колектора:**

1 – корпус; 2 – болт; 3 – натискне кільце; 4 – міканітова прокладка; 5 – «півник»; 6 – «ластівчин хвіст»; 7 – колекторна пластина 130



**Рис. 65. Щітковий механізм машини постійного струму:**

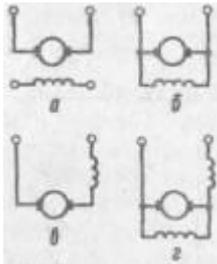
а – траверса; б – щіткотримач; 1 – щітковий палець; 2 – ізоляція кільця від траверси; 3 – стопорний болт; 4 – мідний провід; 5 – натискні пластини; 6 – місце розміщення пружини; 7 – обойма; 8 – щітка

Під час роботи машини щітки ковзають по колектору. Щіткотримачі кріплять до траверси.

### 3. Типи і характеристики машин постійного струму.

Машини постійного струму розрізняють за способом збудження.

У машинах з *незалежним збудженням* обмотка збудження живиться від побічного джерела струму (рис. 66, а). Якщо обмотка збудження дістає живлення від затискачів якоря і з'єднана з ними паралельно, таку машину називають машиною з *паралельним збудженням* (рис. 66, б). Таку саму машину, але з послідовним з'єднанням обмотки збудження із затискачами якоря називають машиною з *послідовним збудженням* (рис. 66, в). У машинах зі *змішаним збудженням* є дві обмотки збудження, одна з яких з'єднана із затискачами якоря послідовно, а друга – паралельно (рис. 66, г).

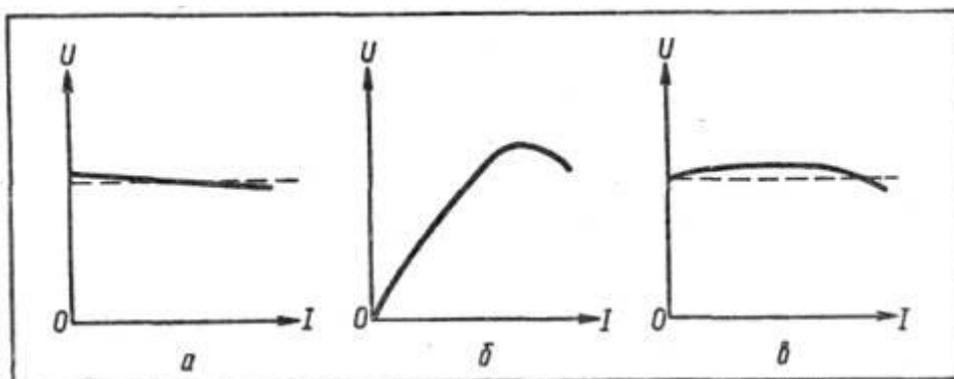


**Рис. 66. Схеми машин постійного струму (пускові й регулювальні реостати не показано):**

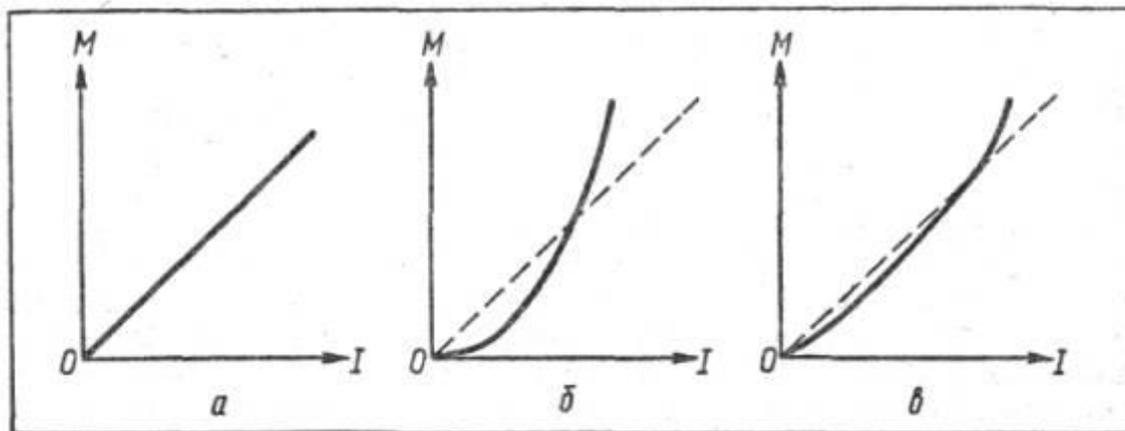
а – з незалежним збудженням; б – з паралельним збудженням; в – з послідовним збудженням; г – зі змішаним збудженням

Характеристики машини постійного струму показують її робочі якості. Характеристику генератора, яка виражає залежність між напругою на його затискачах і силою струму в обмотці якоря, називають зовнішньою характеристикою (рис. 67). З рисунка видно, що залежно від способу збудження генератора можна дістати як стабільні, так і регульовані напруги.

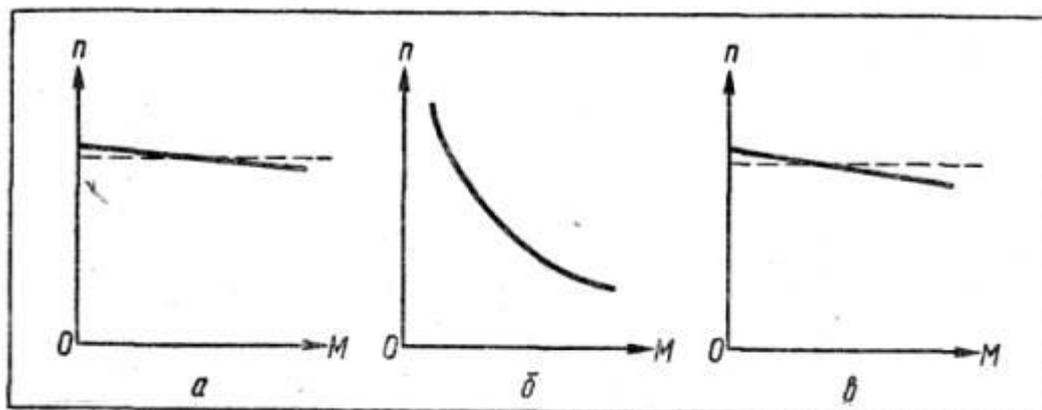
Характеристики двигунів постійного струму виражають також залежність обертаючого моменту від сили струму в обмотці якоря (рис. 68) і частоти обертання від обертаючого моменту (рис. 69). Залежність частоти обертання від обертаючого моменту називають механічною характеристикою двигуна. Ці характеристики показують, що залежно від способу живлення обмотки збудження можна в широких межах регулювати як значення обертового моменту, так і частоту обертання двигуна постійного струму.



**Рис. 67. Зовнішня характеристика генератора постійного струму:**  
*а – з незалежним і паралельним збудженням; б – з послідовним збудженням; в – зі змішаним збудженням*



**Рис. 68. Залежність обертаючого моменту на валу електродвигуна постійного струму від сили струму в обмотці якоря:**  
*а – з незалежним і паралельним збудженням; б – з послідовним збудженням; в – зі змішаним збудженням*



**Рис. 69. Механічна характеристика електродвигуна постійного струму:**  
*а – з незалежним і паралельним збудженням; б – з послідовним збудженням; в – зі змішаним збудженням*

#### 4. Спеціальні машини постійного струму.

Потреба в спеціальних машинах постійного струму виникла в основному в зв'язку з автоматизацією виробництва і розвитком електрифікованого транспорту.

Йшлося про генераторні датчики – мікромашини постійного струму, які застосовують для перетворення частоти обертання вала двигуна на електричний сигнал. Таку мікро-машину з незалежним збудженням, вмонтовану в тахометр, називають *тахогенератором*.

У системах автоматичного керування і регулювання застосовують *виконавчі двигуни*. Вони призначені для перетворення електричного сигналу на механічне переміщення, наприклад на обертання вала. Потужність виконавчих

двигунів звичайно становить 500...600 Вт. Вони мають відповідати таким вимогам, як швидкодія, висока надійність, точність регулювання частоти обертання. Як виконавчі використовують двигуни постійного струму з друкованою обмоткою якоря. Якір виготовляють у вигляді тонкого диска з текстоліту, скла або іншого немагнітного матеріалу, на обидва боки якого друкованим способом наносять провідники обмотки якоря. Магнітне поле статора створюється постійними магнітами і підсилюється за допомогою кілець з феромагнітного матеріалу. Останнім часом застосовують також машини постійного струму з гладеньким якорем. У нього обмотка розміщена не в пазах, а безпосередньо на осерді. Ці машини мають поліпшені характеристики, які забезпечуються меншою індуктивністю обмотки якоря і підвищеною магнітною Індукцією в повітряному зазорі між якорем і статором.

В автоматичних системах звичайно потрібно підсилювати електричні сигнали. Для цього часто застосовують підсилювачі, у яких енергія перетворюється за допомогою електронних ламп або транзисторів. Поширені також *електромашинні підсилювачі* (ЕМП).

Такий підсилювач являє собою машину постійного струму, на обмотку збудження якої може подаватися сигнал, який треба підсилити. Підсилення досягається за рахунок використання енергії первинного двигуна, як правило, електричного. За допомогою електромашинних підсилювачів потужність сигналу підсилюється в  $10^4$ – $10^5$  разів.

На електрифікованому транспорті застосовують *тягові електричні двигуни*. Звичайно це двигуни постійного струму з послідовним збудженням. Проте умови роботи їх відрізняються від умов роботи електричних двигунів, які використовують у стаціонарних установках. Тягові двигуни працюють в умовах частого пуску, різних змін напруги, сили струму, частоти обертання. Отже, тягові двигуни повинні мати великий пусковий обертовий момент (забезпечується завдяки послідовному збудженню) і можливість регулювання в широких межах частоти обертання. Усе це зумовлює особливості конструкції тягових двигунів на відміну від електричних машин загального призначення.

## Лекція № 14

**Тема: Трансформатори. Призначення, будова і принцип дії трансформатора.**

### План

1. Визначення.
2. Класифікація трансформаторів та коротка характеристика основних типів.
3. Принцип дії трансформатора (на прикладі найпростішого). Коефіцієнт трансформації.
  1. Особливості конструкції трансформаторів:

- призначання та конструкція осердя;
- призначання та конструкція обмоток;
- охолодження обмоток.

**1. Трансформатор** – статичний електромагнітний пристрій із двома або більшим числом індуктивно зв'язаних обмоток, який служить для перетворення за допомогою електромагнітної індукції змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги.

## 2. Класифікація.

За призначенням трансформатори бувають: силові, узгоджувальні та імпульсні;

за потужністю – малої, середньої та великої потужності;

за кількістю обмоток – двообмоткові та багатообмоткові;

за способом охолодження – сухі і масляні;

за типом осердя – стержньові, броньові і тороїдні; а також – без осердя (повітряні);

за кількістю фаз – однофазні і трифазні.

**Силові трансформатори** призначені для перетворення електричної енергії в електричних мережах та в установках для її приймання і використання. Вони складають основну, найбільш численну групу.

Потужні силові трансформатори встановлюють на електростанціях для підвищення електричної енергії генераторів. Передача електроенергії по лінії електропередачі високою напругою і малими струмами значно зменшує втрати потужності, що дає можливість зменшити переріз проводів та істотно знизити витрати кольорового металу.

У кінці лінії електропередачі встановлюють трансформатори, які знижують напругу до рівня, необхідного для розподілу її між великими споживачами (міста, населені пункти, промислові підприємства, цехи підприємств та ін.). У місцях споживання електроенергії встановлюють трансформатори, які знижують напругу до експлуатаційної. Більшість споживачів працюють при напрузі 220, 380 і 660 В.

Отже, електроенергія, яка передається від електростанції до електроприймачів, трансформується декілька разів. Спочатку підвищується, а потім знижується.

Трансформатори, призначені для підвищення напруги, називаються *підвищувальними*, а трансформатори, призначені для зниження напруги, – *знижувальними*.

Трансформатори широко використовують у радіо- і телеапаратурі, у вимірювальних пристроях, місцевому освітленні тощо.

Трансформатори, які використовуються для узгодження напруги або опорів між каскадами в радіопристроях, називаються *узгоджувальними*.

Трансформатори, призначені для передачі імпульсів напруги або струмів з однієї мережі в іншу, називаються **імпульсними**. Вони широко використовуються в імпульсній техніці.

Залежно від потужності трансформатори випускають з природним і масляним охолодженням. Активні частини трансформаторів у потужних енергетичних установках занурюють в мінеральне трансформаторне масло для кращого відведення тепла і поліпшення ізоляції.

Трансформатори малої потужності випускають з повітряним охолодженням.

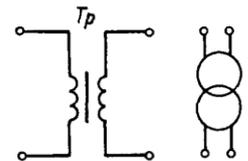
### 3. Принцип дії трансформатора.

**Магнітопровід** - це феромагнітне осердя трансформатора, на якому розташовуються обмотки.

**Обмотка** – це провід, обмотаний навколо стержня магнітопроводу для створення магнітного поля під дією струму, що протікатиме обмоткою, або для зворотного явища (електромагнітної індукції).

Обмотка, до якої підводиться електрична енергія, називається **первинною**, а обмотка, від якої відводиться електрична енергія, – **вторинною**.

Умовне позначення однофазного трансформатора



В основі роботи будь-якого трансформатора лежить явище електромагнітної індукції.

Розглянемо принцип дії трансформатора на прикладі однофазного двообмоткового трансформатора.

Під час вмикання первинної обмотки трансформатора до мережі змінного струму з напругою  $U_1$  у ній виникає струм  $I_1$ , який збуджує в магнітопроводі змінний магнітний потік  $\Phi$ . Замикаючись по магнітопроводу, змінний магнітний потік перетинає витки обмоток та індукує в первинній обмотці ( $w_1$ ) е.р.с.  $e_1$ , а у вторинній обмотці ( $w_2$ ) е.р.с.  $e_2$ .

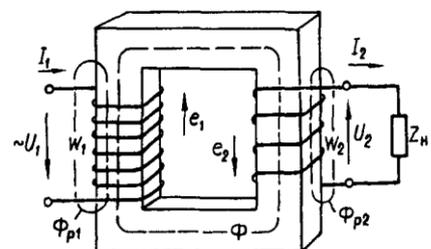


Рис. 6.3. Схема принципу дії однофазного двообмоткового трансформатора.

Під час вмикання вторинної обмотки до навантажування е.р.с.  $e_2$  створить у ній струм  $I_2$ .

Отже, у трансформаторі електрична енергія первинного кола з параметрами  $U_1, I_1$  та частотою  $f$  перетворюється в електричну енергію змінного струму з параметрами  $U_2, I_2$  та частотою  $f$ .

Поряд з основним магнітним потоком у трансформаторі ще є змінні магнітні потоки розсіювання  $\Phi_{p1}$  та  $\Phi_{p2}$ , які замикаються навколо витків первинної та вторинної обмоток в основному через повітря. Магнітні лінії потоків розсіювання зчеплені тільки з витками своєї обмотки і не беруть участі

у передачі енергії з первинного кола до вторинного. У кожній з обмоток вони створюють е.р.с.  $e_{p1}$  та  $e_{p2}$  відповідно.

Змінні е.р.с.  $e_1$  і  $e_2$  залежать від кількості витків і швидкості зміни магнітного потоку:

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

Оскільки е.р.с.  $e_1$  і  $e_2$  створюються одним і тим самим магнітним потоком при синусоїдальній напрузі, то діючі значення е.р.с.  $E_1$  і  $E_2$  залежатиме від частоти струму, витків обмотки та магнітного потоку:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi;$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi.$$

Поділивши значення е.р.с. первинного і вторинного кола, одержимо вираз для коефіцієнта трансформації:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = n.$$

Отже, коефіцієнт трансформації – це відношення е.р.с. обох обмоток або відношення чисел витків цих обмоток.

У трансформаторі виникає подвійне перетворення електричної енергії. Спочатку електрична енергія мережі у первинній обмотці перетворюється в енергію магнітного поля і передається у вторинну обмотку. У вторинній обмотці енергія магнітного поля перетворюється в електричну і передається у навантаження.

Втрати трансформатора на нагрівання його обмоток, магнітопроводу невеликі. Тому, нехтуючи втратами, **можна вважати**, що у трансформаторі перетворюються тільки напруга і струм, а **потужність**  $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$  залишається незмінною:

При цьому  $U_1 \approx E_1$ ,  $U_2 \approx E_2$ .

Вираз для **коефіцієнта трансформації** можна переписати у вигляді

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = n.$$

Якщо не враховувати втрати активної та реактивної потужності в трансформаторах, які зумовлені основним магнітним потоком і потоком розсіювання, то можна вважати, що коефіцієнт трансформації буде

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1},$$

тобто струми в трансформаторі обернено пропорційні їхнім напругам.

4. Особливості конструкції трансформаторів.

Конструкція трансформатора залежить від його габаритів, які, в свою чергу, залежать від номінальної потужності трансформатора.

Основні частини трансформатора – магнітопровід та обмотки.

Основне призначення магнітопроводу – підсилення магнітного зв'язку між обмотками трансформатора, тобто зменшення магнітного опору контуру, крізь який проходить магнітний потік.

Частини магнітопроводу, на яких розміщені обмотки, називаються **стержнями**, а частини, на яких немає обмоток, – **ярмом**.

Магнітопровід набирається із листів електротехнічної сталі завтовшки 0,36...0,5 мм, які ізолювані один від одного лаком, папером або окалиною. Тобто осердя трансформатора роблять **шихтованим**. Це робиться для зменшення втрат від перемагнічування та вихрових струмів: сталь у своєму складі має кремній, що підвищує електричний опір і не впливає на магнітний опір.

Магнітопровід (осердя) трансформатора буває трьох типів:

- стержньовий,
- броньовий,
- тороїдний.

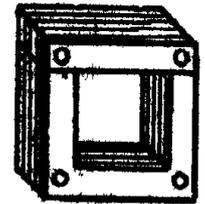
Стержньове осердя набирається із П-подібних ізолюваних пластин трансформаторної сталі.

Позначається стержньове осердя як **П20Х45**,

де П – тип осердя,

20 – ширина стержня, мм,

45 – товщина пакета, мм.

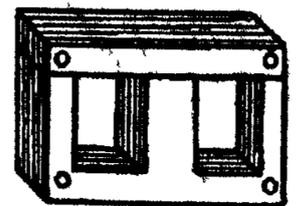


Броньове осердя набирається з Ш-подібних пластин. Обмотки розташовуються концентрично на центральному стержні. У позначенні **Ш20х45**,

Ш – тип осердя (броньовий),

20 – ширина центрального стержня, мм,

45 – товщина пакета, мм.



Тороїдне осердя менш технологічне. Звичайне тороїдне осердя виготовляється нешихтованим. Позначається осердя цього типу таким чином:

**О60х40х10**,

де О – тип осердя (тороїдне),

60 – зовнішній діаметр тора, мм,

40 – внутрішній діаметр осердя, мм,

10 – висота тора, мм.



Осердя усіх типів можуть виготовлятися із феромагнітної стрічки. Це більш технологічне виконання. У цьому разі до позначення типу осердя додається літера «Л». Наприклад: ПЛ, ШЛ, ЛО.

У трансформаторах малої потужності, які використовуються при частотах понад 20 кГц, феромагнітний магнітопровід відсутній, оскільки він фактично не проводить магнітного потоку через витиснення його до поверхні магнітопроводу.

**Обмотки** трансформаторів виготовляють з мідного (рідше – з алюмінієвого) дроту круглого або прямокутного перерізу, ізольованого лаком, кабельним папером або бавовняною пряжею. Їх конструкція залежить від призначення і потужності трансформатора. Вони повинні мати дуже малі втрати енергії.

У кожного трансформатора розрізняють обмотку вищої напруги (**ВН**), та обмотку нижчої напруги (**НН**). Практичне значення такого поділу полягає в тому, що більш висока напруга потребує більш надійної ізоляції обмотки та входних затискачів. Тому обмотку ВН розташовують далі від магнітопроводу, ніж обмотку НН.

За взаємним розташуванням та формою обмотки бувають: концентричні та дискові.

Концентричні обмотки мають форму циліндра (див. рис. 6.2) і можуть бути одношарові і багат шарові.

Дискові обмотки виконують у вигляді дисків (витки одного диску лежать в одній площині) – на стержні магнітопроводу диски НН чергуються з дисками ВН (через диск ізоляції).

Охолодження.

Трансформатори малої потужності мають природне охолодження (повітряне) і їх називають **сухими**.

В трансформаторах значної потужності магнітопровід з обмотками розміщують в ємкості з **трансформаторним маслом**, яке служить для охолодження і, до того ж, посилює ізоляцію обмоток від магнітопроводу.

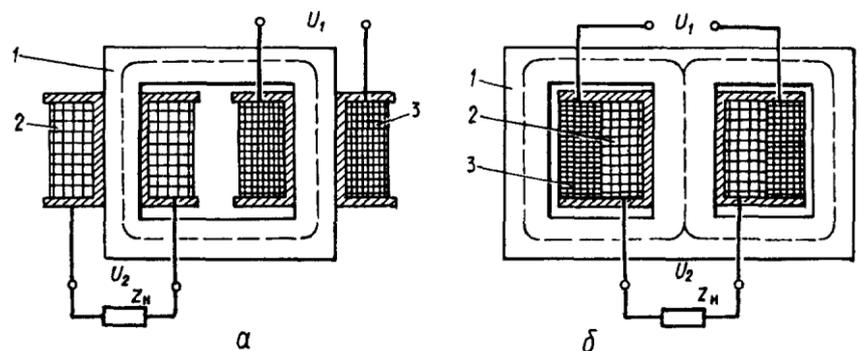


Рис. 6.2. Будова однофазного трансформатора:

*a* – стержньового, *b* – броньового,

*1* – стержень, *2* – вторинна обмотка, *3* – первинна обмотка.

## Лекція № 15

Тема: **Напівпровідникові прилади. Напівпровідникові діоди. Транзистори.**

### План.

1. Пряме і зворотне зміщення (вмикання) р-n-переходу.
2. Класифікація напівпровідникових приладів.
3. Визначення та класифікація напівпровідникових діодів. Загальний вигляд ВАХ діода.
4. Випрямні діоди (призначення і особливості).
5. Стабілітрони (призначення і особливості, схема вмикання)
6. Визначення напівпровідникового транзистора.
7. Визначення і особливості структури біполярного транзистора.

Типи та умовні позначення.

8. Схеми вмикання біполярних транзисторів та їх особливості:
  - схема із загальною базою;
  - схема із загальним емітером;
  - схема із загальним колектором.
9. Вхідні і вихідні ВАХ біполярних транзисторів (на прикладі схеми із загальним емітером).

### 1. Напівпровідники та їх властивості.

Напівпровідниками прийнято називати матеріали кристалічної структури, в яких значно змінюється провідність під дією тепла, світла, електричних та магнітних полів, радіаційного опромінення, а також в результаті додавання в них у вигляді домішок інших матеріалів. До числа напівпровідників відносяться окисли металів, сірчисті з'єднання, з'єднання з селеном. Типові напівпровідники: селен, германій, кремній, телур. Напівпровідники відрізняються від провідників та діелектриків провідністю.

Особливістю металевих провідників є наявність вільних електронів, які являються носіями електричних зарядів, а у діелектриків вільних електронів не має, тому вони не проводять електричний струм. На відміну від провідників, напівпровідники мають не тільки «електрону» провідність, а й «дірочну», яка залежить від температури, освітлення, стиснення, електричного поля та інших факторів.

### 2. Залежність провідності напівпровідників від домішок.

При відсутності домішок і температурі  $T=0$  (абсолютний нуль), усі валентні електрони зв'язані і вільних не має, германій не проводить електричний струм, при збільшенні температури, або при опроміненні збільшується провідність (оскільки збільшується енергія електронів). При кімнатній температурі в кристалі виникає струм.

***Електропровідність зумовлена переміщенням вільних електронів називається електронною провідністю, або провідністю n- типу.***

Після того як з'явилися вільні електрони в ковалентних зв'язках утворюється вільне і незаповнене електроном (вакантне) місце – «електронна дірка», яка має позитивний заряд і будь-який з електронів може зайняти це місце (дірки). Один ковалентний зв'язок буде встановлено, але буде порушено в іншому місці.

**Переміщення «дірок» подібно переміщенню позитивних зарядів – називають «дірковою провідністю».**

**Провідність, яка виникає в результаті переміщення «дірок», називається «дірковою провідністю», або провідністю р- типу.**

У чистого напівпровідника при порушенні ковалентних зв'язків, виникає однакова кількість вільних «електронів» і «дірок».

**Електропровідність напівпровідника при відсутності в ньому домішок називають власною провідністю.**

У випадку коли в кристалі будуть атоми інших елементів, можна отримати перевагу електронів над дірками, або навпаки.

Домішки, що віддають початковому матеріалу електрони називають донорами.

Домішки, які призводять до виникнення дірок називають акцепторами.

### 3. Пряме і зворотне зміщення (вмикання) р-п-переходу.

Якщо до напівпровідникового кристалу з двома типами провідності прикласти зовнішню напругу так, як це показано на рис. 8.2,а ("+" до структури n-типу і "-" до структури р-типу), то вона створить у запираючому шарі електричне поле напруженістю  $E_{зовн}$ , яке співпадає з напрямком поля нерухомих іонів  $E_{зал}$ . Це приводить до розширення запираючого шару (рис. 8.2, а),

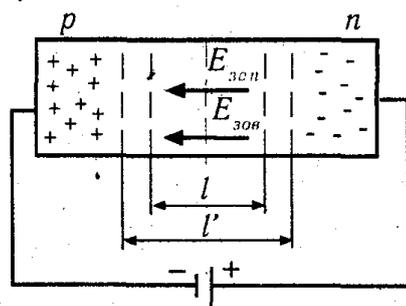


Рис. 8.2. а)

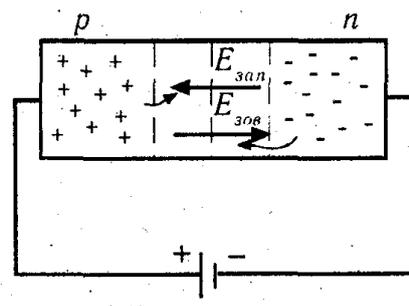


Рис. 8.2. б)

збільшення опору р-п-переходу. Струм через нього дуже малий, оскільки він створюється неосновними носіями зарядів, тобто електронами в р-шарі і дірками в n-шарі. Цей струм називають зворотним, а р-п- перехід у такому стані – закритим.

Якщо змінити полярність зовнішньої напруги (рис. 8.2, б), то зовнішнє поле буде спрямоване назустріч запираючому; запираючий шар стає вужчим і,

при наявності напруги  $0,3 \div 0,5$  В, опір  $p-n$ - переходу різко зменшується і виникає відносно великий струм.

Повна вольт-амперна характеристика (ВАХ)  $p-n$  - переходу показана на рис. 8.3. Вона є суттєво нелінійною.

На ділянці 1  $E_{зовн} < E_{зан}$  і прямий струм малий. На ділянці 2  $E_{зовн} > E_{зан}$ ,  $p-n$ -перехід відкритий і струм обмежено лише опором самого напівпровідника. На ділянці 3 існує лише зворотний струм за рахунок наявності невеликої

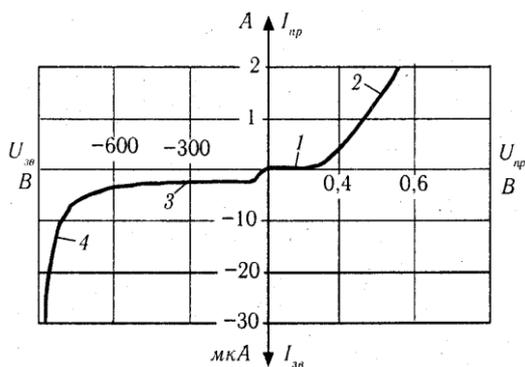


Рис.

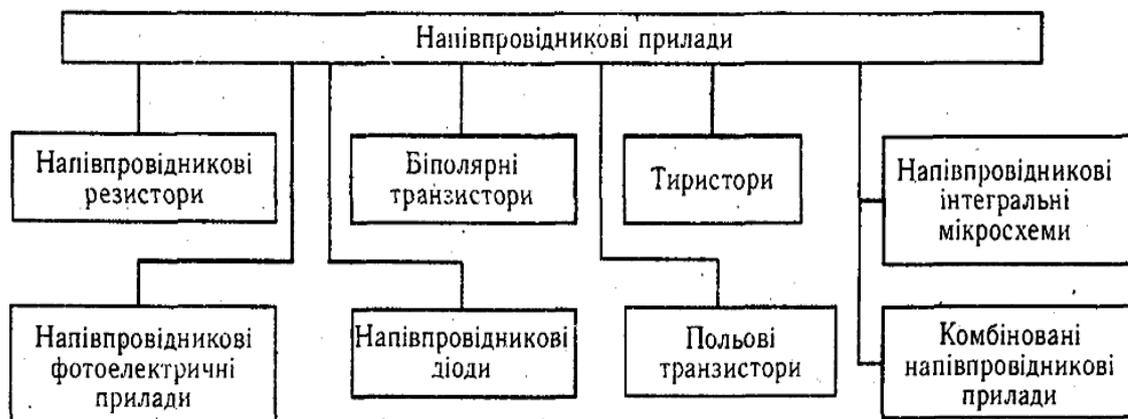
кількості неосновних носіїв зарядів, тобто електронів в  $p$ -зоні і дірок в  $n$ -зоні. Із збільшенням зворотної напруги  $E_{зовн}$  стає такою великою, що неосновні носії починають рухатися з великою швидкістю, достатньою для лавиноподібного розмноження носіїв зарядів – електронів і дірок. Цей вид пробою  $p-n$  - переходу називають лавинним.

Властивості чистих та легованих напівпровідників, а також  $p-n$ -переходу використовують в двохелектродних напівпровідникових приладах – резисторах та діодах. У більш складних приладах – транзисторах і тиристорах – використовують електричні властивості, які утворюються взаємодією декількох  $p-n$ - переходів.

## 2. Класифікація напівпровідникових приладів

Прилади, принцип дії яких засновано на використанні властивостей напівпровідників, називають напівпровідниковими.

Класифікація напівпровідникових приладів:



Напівпровідникові резистори і діоди є двохелектродними приладами. Транзистори і тиристори мають три електроди (виводи). Тиристори можуть бути і двохелектродними.

Електричні характеристики напівпровідникових **резисторів** визначають властивості однорідного напівпровідникового матеріалу, з якого вони виготовлені. Напівпровідниковий матеріал може мати один з двох типів електропровідності, які позначають латинськими літерами  $p$  та  $n$ .

У напівпровідникових **діодах** використовують напівпровідники з різними типами електропровідності, які утворюють один так званий  $p-n$ -перехід. Електричні характеристики діода визначають електричні властивості такого  $p-n$ -переходу.

У **біполярних транзисторах** використовують два  $p-n$ -переходи. Взаємодія цих переходів визначає електричні властивості транзисторів. У **польових транзисторах** застосовують напівпровідники з різними типами провідностей і використовують взаємодію одного з цих однорідних напівпровідників з  $p-n$ -переходом.

У **тиристорах** застосовують напівпровідники з різними типами електропровідності, які утворюють три і більше  $p-n$ -переходи.

У напівпровідникових **фотоелектричних приладах** використовують ефект генерації світла і зміни електричних характеристик напівпровідникових структур під впливом електромагнітного опромінювання оптичного діапазону.

**Комбіновані** напівпровідникові прилади являють собою декілька різних напівпровідникових приладів, об'єднаних в одному корпусі.

Напівпровідникові **інтегральні мікросхеми** – мікроелектронні вироби, які виконують певну функцію обробки сигналу і в яких всі елементи та міжелементні з'єднання виконані в об'ємі та на поверхні напівпровідника.

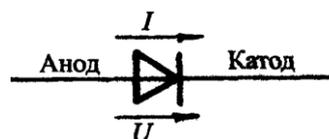
### Напівпровідникові діоди

*Напівпровідниковий діод має один  $p-n$ -перехід та два виводи (електроди). Робота діодів ґрунтується на одnobічній провідності  $p-n$ -переходу. Звичайно діоди мають герметичні корпуси, що сприяють відведенню тепла.*

Напівпровідникові діоди класифікуються за різними ознаками:

- а) типом конструкції переходу (точкові, площинні),
- б) функціональними ознаками (випрямні, стабілітрони, варикапи, імпульсні, детекторні, перетворювальні тощо);
- в) основним матеріалом (германієві, кремнієві та деякі інші);
- г) фізичними процесами (лавинно-пролітні, тунельні, діоди Шоткі, фотодіоди, світлодіоди та інші);
- д) граничними технічними параметрами (малострумні, малопотужні, середньої потужності, великої потужності, низькочастотні, надвисокочастотні та інші).

Умовне позначення діода:



Прямий струм діода спрямований від анода до катода.

**Пряме увімкнення діода** (коли на анод подається позитивний заряд джерела живлення) характеризується дуже малим опором *p-n*-переходу.

**Зворотне увімкнення** (на аноді – негативний потенціал) характеризується великим опором переходу.

Вольт-амперна характеристика діода (рис. 8.2) показує, що при зворотному увімкненні при деякому значенні зворотного струму можливий **електричний пробій** *p-n*-переходу – створення провідного каналу в *p-n*-переході. При пробії зворотний струм діода різко зростає за величиною.

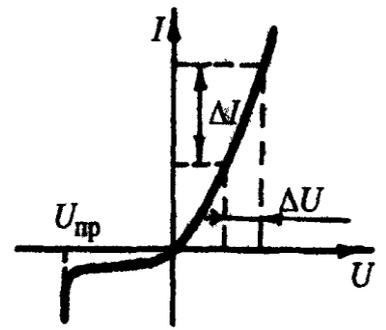
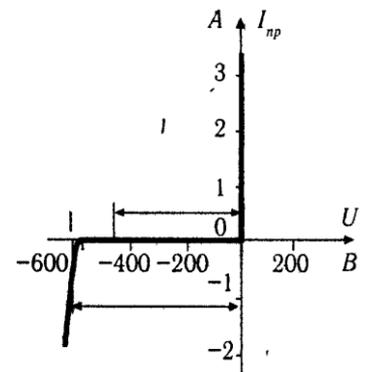


Рис.8.2. Вольт-амперна характеристика діода

**Випрямні напівпровідникові діоди** призначені для випрямлення змінного струму (перетворення його на струм одного напрямку).

Якщо скористатися однаковим масштабом струмів і напруг для прямого і зворотного напрямків, ВАХ діода буде мати вигляд:

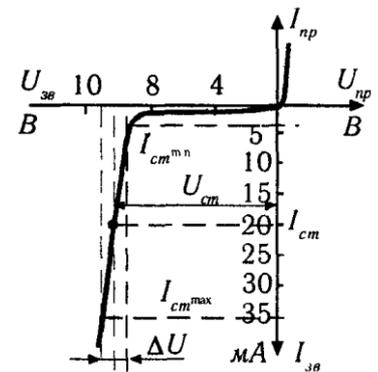


### Стабілітрони.

Для стабілізації напруги використовують напівпровідникові діоди, що називаються стабілітронами.

Робочою ділянкою ВАХ стабілітрона є ділянка зворотної вітки ВАХ *p-n*-переходу у зоні електричного пробію.

Під час зміни струму через стабілітрон від  $I_{cm.min}$  до  $I_{cm.max}$  напруга на стабілітроні незначно зростає на  $2\Delta U$ . Середньому значенню струму стабілітрона  $I_{cm}$  відповідає напруга стабілізації  $U_{cm}$ . Можливі відхилення від напруги стабілізації складають звичайно  $\Delta U = (0,05 \div 0,2)U_{cm}$ .



Таким чином, **досить великі зміни зворотного струму майже не змінюють напругу на стабілітроні**.

Мінімальні і максимальні робочі струми напівпровідникових стабілітронів дорівнюють  $I_{cm} = 1 \div 10 \text{ мА}$ , а  $I_{cm.max} = 50 \div 2000 \text{ мА}$ .

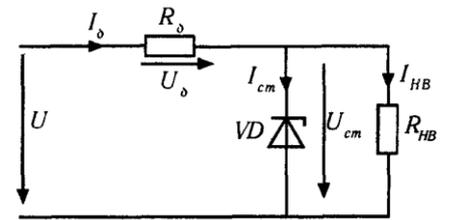
Напруга стабілізації  $U_{cm}$  може знаходитись у межах  $U_{cm} = 1 \div 1000 \text{ В}$ . Але найчастіше в електронних пристроях систем автоматизації застосовуються стабілітрони з  $U_{cm} = 3,3 + 24 \text{ В}$  і з  $I_{cm.max} = 5 \div 70 \text{ мА}$ .

Застосовуються і більш потужні стабілітрони, наприклад, Д815, які мають  $U_{cm} = 4,7 \div 15 \text{ В}$  і струм  $I_{cm} = 0,5 \div 1 \text{ А}$ .

Стабілітрони використовують у параметричних стабілізаторах напруги. Приклад найпростішої схеми вмикання стабілітрона наведено:

паралельно до резистора навантаження  $R_{нв}$  під'єднано стабілітрон  $VD$ ;

баластний резистор  $R_s$  застосовується для досягнення робочого режиму стабілітрона.  
8.4.1.



**Транзистором** називається напівпровідниковий триелектродний прилад, призначений для підсилення, генерування або перетворення електричних сигналів і перемикання електричних імпульсів у схемах.

Транзистори підрозділяються на біполярні та уніполярні.

**Біполярні транзистори** (або просто транзистори) – це прилади, в яких струм зумовлений рухом носіїв зарядів обох знаків (електронів та дірок).

В **уніполярних** (або *польових*) транзисторах струм зумовлений рухом носіїв зарядів лише одного знаку (електронами чи дірками).

**Біполярний транзистор** – це напівпровідниковий прилад, що має два *p-n*-переходи та три електроди.

Середній електрод називається **базою (Б)**, два крайніх – **емітером (Е)** та **колектором (К)**. Емітер позначають стрілкою.

Треба пам'ятати, що завжди **стрілка спрямована із p-області у n-область**.

Розрізняють два типи біполярних транзисторів: *p-n-p*-типу та *n-p-n*-типу.

Умовне позначення біполярних транзисторів:

Транзистор умовно можна уявити як два послідовно з'єднаних діоди в одному корпусі. Якщо діоди мають спільні катоди, вони створюють транзистор типу *p-n-p*, а якщо спільні аноди – транзистор типу *n-p-n*.

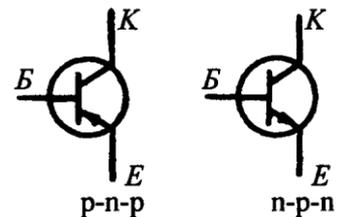


Рис. 8.2.7.

Завжди **емітерний перехід увімкнений прямо**, а

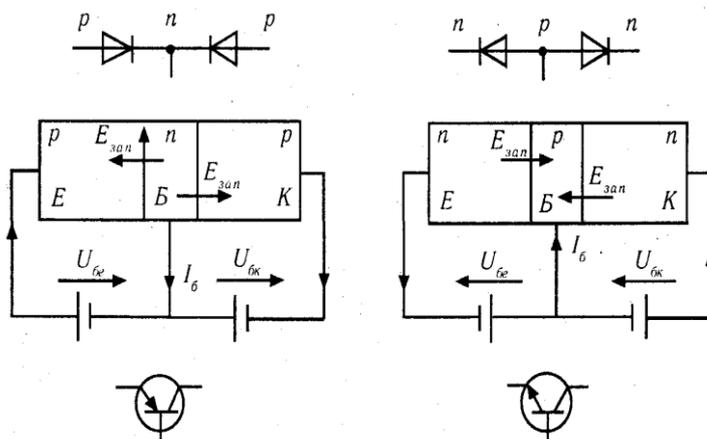


Рис.

колекторний – зворотно.

Через те, що емітерний перехід вмикається прямо, то він має малий опір. Колекторний перехід умикається зворотно і має дуже великий опір. До емітера прикладається невелика напруга, а до колектора дуже велика (десятки вольт). Малою зміною струму емітерного переходу можна керувати великими змінами струму у колі колектора, тобто навантаження. Таким чином, транзистор підсилює потужність.

У якості підсилювального елемента транзистор застосовується в схемах підсилювачів електричних сигналів.

Змінна електрична величина подається на вхід підсилювача. За допомогою енергії джерела живлення підсилювач забезпечує на навантаженні форму вхідного сигналу, величина якого підвищується.

Транзистор може бути ввімкнений у схему підсилювача (підсилювальний каскад) трьома різними способами:

- а) за схемою із загальною базою,
- б) із загальним емітером,
- в) із загальним колектором.

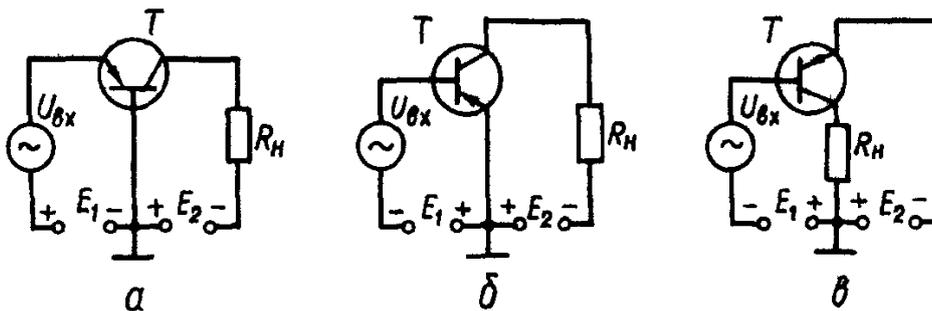


Рис. 8.2.9.

Принцип підсилювання електричних коливань у різних схемах однаковий, але кожна із схем має відмінні від інших властивості.

В схемі *із загальною базою* транзистор має великий коефіцієнт підсилення за напругою і потужністю (до тисячі).

Важливою перевагою схеми *із загальним емітером* порівняно зі схемами із загальною базою та загальним колектором є велике підсилення за струмом.

Коефіцієнт підсилення за напругою для схеми із загальним емітером приблизно такий, як і в схемі з загальною базою.

Коефіцієнт підсилення за потужністю для схеми із загальним емітером досягає декількох тисяч. У схемі з *загальним колектором* вхідний опір дуже великий (десятки й сотні кілоом), а вихідний – дуже малий (десятки або сотні Ом). Тому каскад із загальним колектором має коефіцієнт підсилення за напругою менше одиниці, за струмом – більше десяти, а за потужністю – менше, ніж за струмом.

Ця схема використовується в основному для узгодження опорів між окремими каскадами або між виходом підсилювача і низькоомним навантаженням.

### Характеристики транзисторів.

Важливим показником підсилювальних і інших властивостей транзистора є сімейство його характеристик: статичних і динамічних.

**Статичною** називається характеристика транзистора, що описує взаємозв'язок між вхідними та вихідними струмами та напругами, коли у вихідному колі немає навантаження.

Застосовуються такі статичні характеристики біполярних транзисторів:

- а) вхідні;
- б) вихідні;
- в) перехідні.

**Вхідна характеристика** – це залежність  $I_{вх} = f(U_{вх})$  при сталій напрузі на виході ( $U_{вих} = const$ ).

**Вихідна характеристика** – це залежність  $I_{вих} = f(U_{вих})$  при сталому вхідному струмі ( $I_{вх} = const$ ).

**Перехідна характеристика** (характеристика підсилення) – це залежність  $I_{вих} = f(I_{вх})$  при сталій напрузі на виході ( $U_{вих} = const$ ).

Вхідні і вихідні характеристики будують експериментально, а перехідні можна побудувати за допомогою сім'ї вихідних характеристик.

Статичні характеристики біполярних транзисторів різні для кожної зі схем вмикання транзисторів.

На рис. 8.2.10 наведено **вхідні статичні характеристики** транзистора *p-n-p*-типу, що увімкнений за схемою із спільним емітером.

Вхідна характеристика (вольт-амперна характеристика емітерного переходу) являє собою звичайну праву вітку вольт-амперної характеристики діода. Напівпровідниковий транзистор не можна чисто механічно уявляти у вигляді двох діодів, тому що процеси в одному переході впливають на процеси в іншому. Вигляд вхідної характеристики залежить від напруги між емітером та колектором.

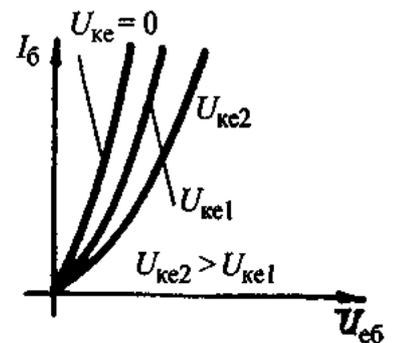


Рис. 8.2.10.

**Вихідна характеристика** нагадує вольт-амперну характеристику діода, що увімкнений зворотно. На струм колектора значною мірою впливає струм бази. У робочій області струм колектора незначно залежить від напруги між колектором та емітером (рис. 8.2.11).

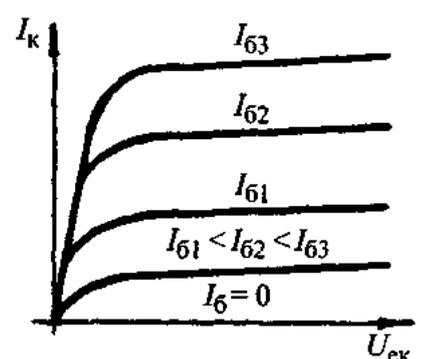


Рис. 8.2.11.

## Зміст

<b>1. Лекція № 1</b>	
Тема: Основні задачі і напрямки електротехніки. Основні історичні моменти. Три напрямки розвитку галузі.....	3
<b>2. Лекція № 2</b>	
Тема: Електричні кола постійного струму. Основні поняття. Поняття електричного кола. Елементи кола, його характеристики і параметри.....	6
<b>3. Лекція № 3</b>	
Тема: Основні закони електричних кіл. Визначення вузла, вітки, контуру в колі. Закон Ома (для ділянки кола, для повного кола). Два закони Кірхгофа.....	12
<b>4. Лекція № 4-5</b>	
Тема: Розрахунок простих електричних кіл.....	16
<b>5. Лекція № 6</b>	
Тема: Електрична ємність провідників. Конденсатор. Основні поняття.....	20
<b>6. Лекція № 7</b>	
Тема: Магнітні кола. Магнетизм та електромагнетизм. Основні поняття.....	24
<b>7. Лекція № 8</b>	
Тема: Електричні кола змінного струму. Основні поняття кіл синусоїдних струмів. Розрахунок кіл синусоїдального струму.....	28
<b>8. Лекція № 9</b>	
Тема: Розрахунок кіл синусоїдних струмів. Нерозгалужене коло змінного струму з $R, L, C$ .....	33
<b>9. Лекція № 10</b>	
Тема: Перехідні процеси в колах з ємністю.....	43
<b>10. Лекція № 11</b>	
Тема: Електричні вимірювання. Вимірювання електричних величин.....	48
<b>11. Лекція № 12</b>	
Тема: Електровимірювальні прилади деяких систем.....	53
<b>12. Лекція № 13</b>	
Тема: Класифікація машин. Електричні машини постійного струму. Принцип дії машин постійного струму. Будова машин постійного струму.....	59
<b>13. Лекція № 14</b>	
Тема: Трансформатори. Призначення, будова і принцип дії трансформатора.....	66
<b>14. Лекція № 15</b>	
Тема: Напівпровідникові прилади. Напівпровідникові діоди. Транзистори.....	72
<b>15. Література.....</b>	<b>81</b>

## ЛІТЕРАТУРА

Електроніка та мікросхемотехніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» / А. А. Щерба, К. К. Победаш, В. А. Святненко: – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 360 с. - Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/3569>

1. Електротехніка та електроніка. Теоретичні відомості, розрахунки та дослідження за підтримкою комп'ютерних технологій: Навч. посіб. /Щерба А.А., Рябенський В.М., Кучеренко М.Є., Победаш .К.К. та ін. – К.: "Корнійчук", 2007, - 488 с. з іл.

2. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за напрямками “Електромеханіка” та “Електротехніка”: У 4-х т. /Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. та ін. Т2. Аналогові та імпульсні пристрої. –Харків: Фоліо, 2002.

3. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб. 2-е вид. – К.: Каравела, 2004, - 432 с.

4. Руденко В.С., Сенько В.І., Трифонюк В.В. Основы промышленной электроники. – К.: Выща шк., 1985. – 400 с.

5. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. –М.: Энергоатомиздат, 1988. 7. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. –М.: ВШ, 1982.

6. Скаржепа В.А., Луценко А.Н. Электроника и микросхемотехника. Ч.1. Электронные устройства информационной автоматики. –К.: Выща шк., 1989.

7. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника. –М.: Горячая Линия – Телеком, 2000.

8. Методические указания к выполнению лабораторного практикума по разделу «Аналоговые устройства и системы» курса «Энергетическая электроника» для студентов факультета «Электроэнерготехника и автоматика». /Сост. В.И.Сенько, Н.П.Макаренко, К.К.Победаш, В.С.Смирнов. –К.: КПИ, 1989.

9. Розділ «Аналогові пристрої та системи» // Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Електроніка» для студентів

електротехнічного та електроенергетичного фаху. /Укладачі: В.І.Сенько, М.П.Макаренко, К.К.Побєдаш та ін. –К.: КПІ, 1993.

10. Основи схемотехніки електронних систем: Підручник /В.І.Бойко, А.М.Гуржій, В.І.Жуйков та ін. – К.: Вища шк., 2004.

11. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисциплін «Електроніка та мікросхемотехніка», «Електроніка і схемотехніка» для студентів вищих навчальних закладів усіх форм навчання, що навчаються за напрямками «Електромеханіка», «Електротехніка», «Опtotехніка». Розд. «Аналогові пристрої», з грифом НТУУ «КПІ» укладачів: А.А Щерби, В.І.Сенько, К.К.Побєдаша та інші.