

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ КОЛЕДЖ**

Конспект лекцій

з навчальної дисципліни Теоретичні основи електротехніки

для спеціалізації 151.1

Обслуговування інтелектуальних інтегрованих систем

2020 р.

Автор – Саун О. В., викладач Харківського державного політехнічного коледжу

Методичний посібник для виконання самостійних робіт
затверджений на засіданні циклової комісії з електромеханіки

Протокол № _____ від “ _____ ” _____ 20__ р.

Голова циклової комісії _____ (М.М. Бочарніков)

Схвалено методичною радою Харківського державного
політехнічного коледжу

Протокол № _____ від “ _____ ” _____ 20__ р.

Голова методичної ради _____ Р.М. Корольова

Тема 1 Електричне поле. Закон Кулона.

Зараз відома, що в основі всієї багатогранності явищ лежать чотири фундаментальних взаємодії між елементарними частками – сильне, електромагнітне, слабе і гравітаційне. Кожний вид взаємодії зв'язав з характеристикою частини. Наприклад, гравітаційна взаємодія залежить від маси часток; електромагнітна - від електричних зарядів.

Електричний заряд частки є одною з її основних характеристик і невіддільною властивістю частинки. Частинку без заряду уявити собі можна, а заряд без частинки – неможливо.

Виявляють себе заряджені частинки у притяганні (різноміненні заряди) або у відштовхуванні (одноріменні заряди) з силами, що набагато перевищують гравітаційні. Так сила тяжіння електрона до ядра в атомі водню в 10 в 20 степені раз більша за силу гравітаційного тяжіння цих часток. Отже, **електричний заряд – це фізична величина, що є джерелом електричного поля, за допомогою якого здійснюється взаємодія частинок, що мають заряд.**

Фундаментальні властивості електричного заряду :

1. Електричний заряд існує в двох видах: додатний і від'ємний;
2. В будь-якій електрично-ізолюваній системі, при будь-якій взаємодії тіл алгебраїчна сума зарядів є величина постійна (закон збереження електричного заряду) – один з основних законів фізики.
3. Електричний заряд не залежить від того рухається заряд або покоїться.

Найменшими стабільними частками, які мають взаємний електричний заряд і входять до складу будь-якої речовини є електрони (протони). Їх електричні заряди за абсолютною величиною дорівнюють $1,602 \cdot 10^{-19}$ степені Кл. Цей заряд називають елементарним.

Електричний заряд будь-якого зарядженого тіла дорівнює цілому числу елементарних зарядів. В електронейтральній (незарядженій системі) є однакове число елементарних зарядів протилежного знаку. Електрично нейтральними є атоми, молекули і їх колективи.

Якщо електрична нейтральність тіла порушена, то воно називається наелектризованим. Для цього необхідно, щоб на тілі був створений не достаток або надлишок електричних зарядів того чи іншого знаку. Електризація тіл відбувається різними способами. Найпростішою є електризація через доторкання або тертя. При дотиканні деяких тіл відбувається контакт між різнорідними речовинами. При цьому валентні електрони атомів однієї з речовини переходять в іншу речовину. Переміщення електронів при цьому не перевищує розмірів міжатомних відстаней. Але, якщо тіла після тертя роз'єднати, то вони виявляються зарядженими: тіло, яке віддало частину своїх електронів буде заряджене позитивно, а тіло яке їх отримало - негативно.

Нові електричні заряди при цьому не виникають. Відбувається лише розділення існуючих зарядів між тілами, що електризуються.

Закон Кулона – один з основних законів електростатики. Він визначає величину та напрям сили взаємодії між двома нерухомими точковими зарядами.

Під точковим зарядом розуміють заряджене тіло, розмір якого набагато менший за відстань його можливої дії на інші тіла. В такому випадку ані форма, ані розміри заряджених тіл практично не впливають на взаємодію між ними.

Закон Кулона вражає схожий на закон всесвітнього тяжіння

$$F = G \left(\frac{m_1 \cdot m_2}{R^2} \right)$$

G – постійна тяжіння;

m_1, m_2 – маси тіл;

R – відстань між тілами.

І формулюється таким чином : **Сила взаємодії двох точкових нерухомих заряджених тіл у вакуумі прямо пропорційна добутку модулів зарядів та обернено пропорційна квадрату відстані між ними.**

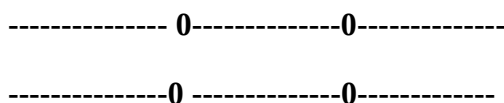
$$F = K \left(\frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2} \right)$$

Q_1, Q_2 – модулі зарядів;

R – відстань між ними;

K – коефіцієнт пропорційності, який залежить від вибору системи одиниць.

Сила взаємодії спрямована по прямій, що з'єднує заряди, причому однойменні заряди відштовхуються, а різнойменні – притягуються.



Сила взаємодії між зарядами залежить від середовища між зарядженими тілами. У повітрі сила взаємодії майже не відрізняється від такої сили у вакуумі. Закон Кулона виражає взаємодію зарядів у вакуумі.

Кулон – одиниця системи СІ кількості електрики. Вона є похідною одиницею сили струму – Ампер. За одиницю електричного заряду приймають заряд, що проходить через поперечний переріз провідника при силі струму 1 А за час 1 с.

Коефіцієнт K в законі Кулона при його записі в системі СІ дорівнює

$$K = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$$

Часто його записують у вигляді $K = \frac{1}{4\pi\epsilon}$, де

$\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$ - електрична стала.

У середовищі з діелектричною проникністю ϵ -закон Кулона має вигляд

$$F = K \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon R^2}$$

Відносна діелектрична проникність середовища – це фізична величина, яка показує, у скільки разів модуль сили Кулона усередині однорідного діелектричного середовища менший за модуль сили Кулона у вакуумі. Відносна діелектрична проникність ϵ величина безрозмірна. Значення для багатьох середовищ є табличними.

Електричним полем називається одна із частин електромагнітного поля. Електричне поле створюється електричними зарядами або зарядженими тілами, а також діє тільки на ці об'єкти.

Основні властивості поля:

1. Воно матеріальне і існує незалежно від нашої свідомості.
2. Діє на електричні заряди з деякою силою. Саме за цією дією встановлюється факт його існування. Дія поля на одиничний заряд – напруженість поля – є однією з основних характеристик, за якою вивчається розподіл поля у просторі.

Електричне поле нерухомих зарядів називається електростатичним. З часом воно не змінюється, нерозривно зв'язане з зарядами, що його породили то існує у просторі, який його оточує.

Контрольні питання:

1. Яке електричне поле називається однорідним?
2. Сформулюйте закон Кулона.
3. Що називається абсолютною та відносною діелектричною проникністю?

Література:

Попов В.С. «Теоретична електротехніка» с. 240-243

Тема 2 Напруженість електричного поля. Електричний потенціал. Напруга.

Електричне поле - особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія електрично заряджених частинок.

Напруженість електричного поля – векторна характеристика поля – сила, що діє на одиничний нерухомий у даній системі відліку електричний заряд.

Напруженість визначається за формулою $E = F/Q$

E – Напруженість поля;

F - сила, що діє на розміщений у деякій точці заряд;

Q - заряд частинки.

Напрямок вектора напруженості збігається з напрямом сили, що діє на позитивний заряд та протилежна напрямку сили, що діє на негативний заряд.

Одиницею напруженості є CI є Вольт ділений на метр.

Напруженість поля точкового заряду. Згідно з законом Кулона, точковий заряд діятиме на інший заряд з силою, що дорівнює $F = K(Q_1 * Q_2 / R^2)$

Модуль напруженості поля точкового заряду на відстані від нього дорівнює $E = F/Q = K \cdot Q / R^2$

Вектор напруженості у будь – якій точці електричного поля спрямований уздовж прямої, що з'єднує цю точку та заряд.

Принцип суперпозиції полів.

Принцип суперпозиції(накладання) полів формулюється наступним чином: Якщо у даній точці простору різні заряджені частинки створюють електричні поля, напруженість яких E_1, E_2, E_3 тощо, то результуюча напруженість поля в цій точці дорівнює їх векторній сумі $E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$. Принцип суперпозиції полів справедливий для випадку, якщо поля, створені декількома різними зарядами, ніяк не впливають одне на одне, тобто поводять себе так, ніби інших полів немає. Досвід свідчить, що для полів звичайних інтенсивностей, що зустрічається в природі, це дійсно має місце.

Силкові лінії електричного поля.

Силова лінія, або лінія напруженості електричного поля – це лінія, дотична до якої, в кожній її точці збігається з напрямом сили, що діє на позитивний точковий заряд, який знаходиться в цій точці поля(збігається з напрямом напруженості електричного поля).

Зобразимо найрозповсюдженіші електричні поля:

1 Поле позитивно зарядженої кульки

2 Двох різнойменно заряджених кульок

3 Двох однойменно заряджених кульок

4 Двох пластин, заряджених різними за знаком та одноковими за абсолютною величиною зарядами

На малюнку 4 густина ліній напруженості в просторі між пластинами однакова в усіх точках. Це свідчить про те, що поле між пластинами однорідне. Однорідне поле – це електричне поле, напруженість якого однакова в усіх точках простору.

В електростатичному полі силові лінії не замкнуті. Вони завжди починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних. Вони ніде не перетинаються, т.як перетин силових ліній свідчить про невизначеність напрямку напруженості електричного поля в точках перетину. Густина силових ліній більша поблизу заряджених тіл, де напруженість поля більша.

Поле зарядженої кулі.

Напруженість поля кулі рівномірно зарядженої по об'єму або по поверхні зарядом на відстані від центра кулі, яка перевищує радіус кулі, визначається за тією ж формулою, що і напруженість поля точкового заряду, який розташований в центрі кулі.

$$E = K(Q/r^2)$$

Лінії напруженості такого поля розташовані аналогічно полю точкового заряду

Якщо куля заряджена тільки по поверхні, то поле всередині кулі дорівнює нулю.

Поле рівномірно зарядженої площини.

Це поле є однорідним, тобто однаковим в усіх точках простору.

$$E = \sigma / 2\epsilon_0 \epsilon$$

$\sigma = q/S$ - Поверхнева площа заряду

ϵ - діелектрична проникненість середовища навколо пластини.

Робота електричного поля з переміщення заряду

Нехай в однорідному електричному полі напруженістю E позитивний заряд переміщується на відстань з точки 1 в точку 2. Сила, що діє з боку поля на електричний заряд, спрямована завжди уздовж поля та визначається за формулою

$$F = q \cdot E$$

Можна показати, що робота поля не залежить від форми траєкторії. Достатньо розбити її на малі прямолінійні ділянки. Робота, яка здійснюється постійною силою при прямолінійному переміщенні від точки а до точки б дорівнює скалярному добутку

Таким чином, робота по переміщенню заряду в однорідному електростатичному полі залежить тільки від початкового та кінцевого положення заряду, що рухається від початкового та кінцевого положення заряду, що рухається, та не залежить від форми траєкторії. При переміщенні заряду по замкнутій траєкторії робота дорівнює нулю.

Сила називається потенціальною, якщо робота цієї сили залежить тільки від початкового та кінцевого положення матеріальної точки, на яку діє сила.

Стаціонарне поле, яке діє на матеріальну точку з силою, називається потенціальним полем, якщо сила є потенціальна.

Отже, електростатичне поле, так само, як і гравітаційне, є потенціальним.

Потенціал і різниця потенціалів.

Потенціал електростатичного поля в даній точці чисельно дорівнює роботі, яку здійснюють сили поля з переміщення одиничного позитивного заряду з даної точки у нескінченність.

Потенціал – величина скалярна. Потенціал вважається позитивним, якщо переміщення позитивного одиничного заряду з даної частини поля у нескінченність здійснюється силами поля, та негативним, якщо сили поля перешкоджають такому переміщенню.

Оскільки робота в силовому полі дорівнює різниці потенціальних енергій двох точок поля, між якими здійснюється переміщення.

Різниця потенціалів(напруга) між двома точками поля дорівнює відношенню роботи поля при переміщенні заряду з початкової точки в кінцеву точку до цього заряду.

$$U = \phi_a - \phi_b = A/q$$

Оскільки робота з переміщення заряду в потенціальному полі не залежить від форми траєкторії, то знаючи напругу між двома точками, ми визначимо роботу, що здійснюється полем з переміщення одиничного заряду.

Якщо існують декілька точкових зарядів, то потенціал поля в деякій точці простору визначається як алгебраїчна сума потенціалів електростатичних полів кожного заряду в цій точці.

$$\Phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \dots$$

Еквіпотенціальною поверхнею, або поверхнею рівного потенціалу, для будь – яких точок якої різниця потенціалів дорівнює нулю. Це означає, що робота з переміщення заряду по такій поверхні дорівнює нулю. Лінії напруженості електричного поля перпендикулярні еквіпотенціальним поверхням(сила, що діє на заряд, перпендикулярна дотичній до еквіпотенціальної поверхні). Еквіпотенціальні поверхні однорідного поля являють собою площини, а точкового заряду – концентричні сфери.

Вектор напруженості. Як і сила перпендикулярне еквіпотенціальним поверхням. Еквіпотенціальною є поверхня будь – якого провідника в електростатичному полі, тому що силові лінії перпендикулярні поверхні провідника. Всередині провідника різниця потенціалів між будь – якими його точками дорівнює нулю.

Зв'язок між напругою та напруженістю.

В однорідному електричному полі напруженість в усіх точках однакова, отже, робота з переміщення заряду на відстань між двома точками з якимось потенціалами дорівнює

Таким чином, напруженість поля пропорційна різниці потенціалів та спрямована в бік зменшення потенціалу. Тому позитивний заряд рухається в бік зменшення потенціалу, а негативний – в бік його зростання.

Одиницею напруги(різниці потенціалів) є Вольт.

Різниця потенціалів між двома точками дорівнює 1 Вольт. Якщо під час переміщення заряду в 1 Кл, між цими точками поле здійснює роботу в 1 Дж.

Література :В.С.Попов « Теоретична електротехніка» с.7-11.

Тема 3 Провідники, діелектрики, напівпровідники. Електрична ємність. Конденсатори. Сполучення конденсаторів.

Провідниками називають тіла, по яких електричні заряди переміщуються вільно. До них , в першу чергу, належать метали. Добра провідність металів пояснюється існуванням в них вільних електронів, які рухаються між позитивно зарядженими іонами ґратки. Позитивні іони не беруть участь в перенесенні заряду.

Електронна природа носіїв струму в металах пояснюється таким чином: кристалічна гратка металу складається з позитивно заряджених іонів, розташованих у вузлах гратки, та електронів, що вільно рухаються між вузлами. Вільні електрони – це валентні електрони атомів металу, які залишили « свої » атоми. Вони здійснюють хаотичний рух по кристалу « не пам'ятаючи », якому атому вони належали. Їх називають електронним газом. Вільні електрони беруть участь в тепловому русі, а під дією зовнішнього електричного поля здатні пересуватися направлено, утворюючи електричний струм.

В середині провідника, поміщеного у зовнішнє електричне поле, електростатичне поле відсутнє. Пояснюється це тим, що під дією зовнішнього поля вільні електрони переміщуючись у напрямку, протилежному зовнішньому полю, розподіляються поверхнею провідника. Внаслідок цього одна частина провідника заряджається негативно, протилежна – позитивно. Розділені заряди створюють внутрішнє поле, яке компенсує зовнішнє поле так, що сумарне поле всередині провідника дорівнює нулю. На цьому ґрунтується електростатичний захист. Щоб захистити прилади від впливу електричного поля, їх поміщують в металевий ящик.

Таким розподілом заряду пояснюється електростатична індукція. Якщо пластину металу розрізати по лінії МН, обидві половинки виявляться зарядженими.

Лінії напруженості електричного поля поза провідником завжди перпендикулярні поверхні провідника. У протилежному випадку наявність складової поля, паралельної поверхні, призводила б до постійного переміщення зарядів (електричного струму).

Весь статичний заряд провідника зосереджений на його поверхні. Інакше всередині провідника існувало б електричне поле. Що не відповідає дійсності. Це стосується, як заряджених, так і незаряджених провідників, розташованих в електричному полі.

Діелектрики в електричному полі.

Діелектрики(або ізолятори) – речовини, які відносно погано проводять електричний струм(у порівнянні з провідниками).

У діелектриках всі електрони зв'язані, тобто належать окремим атомам і електричне поле не відриває їх, а лише злегка зсуває, тобто поляризує. Тому в середині діелектрика може існувати електричне поле. Діелектрики поділяються на полярні та неполярні.

Полярні діелектрики складаються з молекул, в яких центр розподілу позитивних та негативних зарядів не збігається. Такі молекули можна уявити у вигляді двох однакових за модулем різнойменних точкових зарядів, що знаходяться на деякій відстані один від одного, названих диполем.

Неполярні діелектрики складаються з атомів та молекул, у яких центри розподілу позитивних та негативних зарядів збігаються.

Поляризація полярних діелектриків.

Розміщення полярного діелектрика в електростатичному полі(наприклад, між двома зарядженими пластинами) призводить до розвертання та зсуву до цього хаотично орієнтованих диполів уздовж поля.

Розвернення відбувається під дією пари сил, прикладених з боку поля до двох зарядів диполя. Зсув диполів називається поляризацією. Однак внаслідок теплового руху відбувається лише часткова поляризація. Всередині діелектрика позитивні та негативні заряди диполів компенсують один одного, а на поверхні діелектрика з'являється зв'язаний заряд, негативний з боку позитивно зарядженої пластини, та навпаки.

Поляризація неполярних діелектриків.

Неполярний діелектрик в електричному полі також поляризується .Під дією електричного поля позитивні та негативні заряди в молекулі зсуваються у протилежні боки так, що центр розподілу зарядів зсувається як у полярних молекул. Вісь наведеного полем диполя орієнтована уздовж поля. На поверхні діелектрика, що прилягають до заряджених пластин, з'являються зв'язані заряди.

Поляризований діелектрик сам створює електричне поле. Це поле послаблює всередині діелектрика зовнішнє поле. Ступінь цього послаблення залежить від властивостей діелектрика. Зменшення напруженості електричного поля в речовині у порівнянні з полем у вакуумі характеризується проникністю середовища.

Відносна діелектрична проникність середовища – це фізична величина, яка показує, у скільки разів модуль напруженості електростатичного поля усередині однорідного діелектрика менше за модуль напруженості поля в вакуумі.

Напівпровідники. Власна провідність напівпровідників.

До напівпровідників відносять широкий клас речовин, які відрізняються від металів тим, що :

- 1 концентрація рухомих носіїв струму в них значно нижча, ніж концентрація атомів.
- 2 ця концентрація може змінюватись під впливом температури, освітленості, невеликої кількості домішок.
- 3 електричний опір зменшується із зростанням температури.

Напівпровідник поводить себе майже, як діелектрик. При високих температурах напівпровідник є провідником.

Будову напівпровідників розглянемо на прикладі кремнію

У кристалічній ґратці кремнію кожен атом має чотири найближчих сусіди. Кремній є чотиривалентний елемент, і взаємодія пари сусідніх атомів здійснюється за допомогою ковалентних або парно електронного зв'язку, коли в кожному зв'язку беруть участь по одному електрону від кожного атома. Це так звані колективізовані електрони: більшу частину часу вони проводять у просторі між сусідніми іонами, утримуючи їх один біля одного. Кожний валентний електрон може рухатися зв'язком уздовж усього кристалу(від одного атома до іншого) . При низьких температурах парно електронні зв'язки достатньо міцні, вони не розриваються, тому кремній не проводить електричний струм.

Електронна провідність

Збільшення температури призводить до збільшення кінетичної енергії валентних електронів та розриву валентних зв'язків. Частина електронів стають вільними(як електрони в металі). Кристали під дією електричного поля починають проводити електричний струм. Провідність напівпровідників обумовлена вільними електронами, називають електронною провідністю.

Діркова провідність

Розрив валентних зв'язків при збільшенні температури призводить до утворення вакантного місця з електроном, якого не вистачає. Воно має ефективний позитивний заряд та зветься діркою. Отже можливий перехід валентних електронів з сусідніх зв'язків на визволене місце. Такий рух негативного заряду (електрона) в одному напрямі еквівалентний руху позитивного заряду в протилежному.

Переміщення дірок кристалом відбувається хаотично, але, якщо до нього прикласти різницю потенціалів, почнеться їх спрямований рух уздовж електричного поля. Провідність кристалу, обумовлена дірками, називається дірковою провідністю.

Електронна та діркова провідність чистих(бездомішкових) напівпровідників називається власною провідністю напівпровідників але вона дуже невелика, так як невелика кількість носіїв заряду.

Домішкова провідність напівпровідників.

Характерною особливістю напівпровідників є їх здатність істотно підвищувати провідність при додаванні домішок до кристалу. Ця провідність називається домішковою. Саме завдяки цій властивості напівпровідники знайшли таке широке застосування.

Домішкова провідність напівпровідників, в залежності від виду домішки, може бути електронною - її створюють донорні домішки або дірковою – її створюють акцепторні домішки. Напівпровідники з електронною провідністю називаються напівпровідниками *p*- типу(від негативний). Напівпровідники з дірковою провідністю називаються напівпровідниками *p* – типу (позитивний).

Донорні домішки, це домішки, додавання яких веде до істотного збільшення концентрації вільних електронів у кристалі. Для того, щоб домішка була донором

електронів, необхідно, щоб валентність елементів, що складають її, була більшою за валентність атомів ґратки. Для кремнію такою донорною домішкою є атоми п'ятивалентного миш'яку (As). Чотири електрони миш'яку беруть участь у створенні парно електронного зв'язку, а п'ятий електрон виявляється дуже слабо зв'язаний з атомом миш'яку та легко стає вільним.

Наявність акцепторних домішок призводить до збільшення концентрації дірок. Валентність акцепторної домішки нижча валентності атомів ґратки кристалу. Для кремнію такою домішкою є тривалентний індій (In). Тепер для утворення нормальних парно електронних зв'язків з сусідами недостатньо одного електрона. У результаті утворюється дірка. За наявності поля виникає діркова провідність.

У напівпровіднику *p* – типу електрони є основними носіями заряду, а дірки – неосновними. У напівпровідниках *p* – типу дірки є основними носіями заряду, а електрони – неосновними.

p-n перехід – це найпростіша напівпровідникова структура яка використовується у більшості напівпровідникових приладів. Для одержання *p-n* переходу напівпровідниковий

зразок легують (вводять до його складу домішки таким чином, щоб в одній його частині переважали донорні домішки, а в іншій – акцепторні). В результаті отримуємо контакт напівпровідника *p* – типу з напівпровідником *p* – типу. Основною властивістю *p-n* переходу є його здатність пропускати струм тільки в одному напрямку, якщо напруга прикладена до зразка так, що провідність здійснюється основними носіями струму «-» з боку напівпровідника *p* – типу, «+» з боку *p* – типу.

Якщо тепер змінити полярність прикладеної напруги, то струм через *p-n* перехід практично не йде, оскільки перехід через контакт здійснюється основними носіями.

На цьому малюнку зображена вольт – амперна характеристика *p-n* переходу. Права частина графіка – прямий перехід (здійснюється основними носіями), ліва, пунктирна, частина графіка – зворотній перехід (здійснений неосновними носіями).

Властивості р-п переходу використовуються для випрямлення змінного струму у пристроях, які називаються напівпровідниковими діодами. Такі діоди виготовляються на основі германію, селену, кремнію. Наприклад, для виготовлення діоду на основі германію, в одну з його поверхонь вплавляють індій. Провідність германію п-типу. Індій утворює в його поверхневому шарі провідність р-типу. Між двома цими діелектриками виникає р-п перехід.

Транзистор – це напівпровідниковий пристрій з трьома електродами, спроможний посилювати електричний сигнал. Транзистори являють собою напівпровідникову структуру, що складається з двох шарів з дірковою р-провідністю, розділених тонким шаром електронної п-провідності. Тонкий прошарок називається базою.

Своїми трьома електродами, які ідуть від ділянок з різним типом провідності, транзистор приєднується до схеми. Лівий перехід є прямим.

Батарея б2 увімкнена таким чином, що правий р-п перехід є зворотнім. Права ділянка називається колектором. Струм у колі колектора практично не відрізняється від струму в колі емітера, незважаючи на те, що р-п перехід у колекторі зворотній. Пояснюється це таким чином: основні носії – дірки з емітера-рухаються в прямому напрямку у базу та, не встигають рекомбінувати з основними носіями бази – електронами (кількість яких дуже мала через товщину шару), дифундують у колектор. Тут вони захоплюються полем, залишаючи коло колектора.

Керуючи струмом за допомогою джерела змінної напруги, увімкненого в коло, можна отримати синхронну зміну напруги не регуляторі, величина якого практично не впливає на силу струму в колекторі. При великому опорі резистора падіння напруги на ньому може на багато порядків підвищувати зміну напруги в колі емітера, а це й означає підсилення сигналу. Транзистори є основними елементами сучасної напівпровідникової електроніки.

Електрична ємність.

Електроємністю провідника називають чисельну величину заряду, яку потрібно надати провіднику, щоб змінити його потенціал на одиницю.

Ємність характеризує здатність провідника накопичувати заряд. Вона залежить від форми провідника, його лінійних розмірів та властивостей середовища, що оточує

провідник. Одиницею ємності в системі СІ є Фарада – ємність провідника, в якому зміна заряду на 1 Кл змінює його потенціал на 1 В.

Електричний конденсатор – пристрій, призначений для отримання електричної ємності заданої величини, який здатен накопичувати та віддавати (перерозподіляти) електричні заряди.

Конденсатор – це система з двох (або декількох) рівномірно заряджених провідників з рівними за величиною, але протилежними за знаком зарядами, розділених шаром діелектрика. Як правило, відстань між обкладинками, що дорівнює товщині діелектрика, набагато менша за розміри самих обкладинок, отже, поле в конденсаторі практично повністю зосереджено між його обкладками. Якщо обкладки – плоскі пластини, поле між ними є однорідним. Електроємність плоского конденсатора визначається за формулою

З'єднання конденсаторів.

1 Паралельне

$$C_{\text{спільне}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Електроємність батареї конденсаторів при паралельному з'єднанні дорівнює сумі електроємностей окремих конденсаторів.

2 Послідовне

$$\frac{1}{C_{\text{спільне}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

При послідовному з'єднанні конденсаторів додаються обернені величини електроємностей.

Електроємність батареї з послідовно з'єднаних конденсаторів менша за електроємність будь-якого конденсатора, а при паралельному їх з'єднанні – більша.

Енергія електричного поля.

Енергія електричного зарядженого конденсатора виражається формулами

Об'ємна густина енергії електричного поля виражається формулою

Література – В.С. Попов « Теоретична електротехніка» - с.248-278

Задача 1

Знайти напругу між обкладинками плаского конденсатора, якщо між його обкладинками розташували фарфорову пластину. Початкова напруга була 200 В, а потім джерело виключили.

Задача 2

Кулі ємністю 1 мкФ передали заряд $3 \cdot 10$ Кл, а кулі ємністю 2 мкФ – заряд $9 \cdot 10$ Кл. Як розподіляться заряди між кулями, якщо їх з'єднати проволокою. На скільки зміниться заряд кожної кульки. Яким буде потенціал кульок?

Тема 4 Електричний струм. Електричне коло та його елементи

Електричним струмом називають упорядкований (спрямований) рух заряджених частинок.

Для того, щоб такий рух відбувся, необхідно:

- 1 наявність в тілі вільних заряджених частинок. Вони називаються носіями струму.
- 2 наявність сили, що примушує носії заряду рухатися в заданому напрямі. Таку силу може забезпечити електричне поле всередині провідника, яке створює між кінцями провідника різницю потенціалів.

Цим вимогам задовольняє металевий провідник, поміщений в електричне поле. Короткочасне виникнення струму спостерігається при з'єднанні провідником зарядженого та незарядженого провідників. Для існування в провіднику постійного струму його необхідно з'єднати з джерелом струму, яке підтримуватиме різницю потенціалів в провіднику. Якщо різниця потенціалів не змінюється з часом, струм називається постійним.

Електричний струм має певний напрям. Напрямом вважають напрям руху позитивно заряджених частинок переміщення реальних зарядів може не збігатися з встановленим напрямом струму. Так, в металах носіями струму є негативно заряджені електрони, які рухаються в зворотньому напрямку.

Наявність електричного струму можна виявити за тією дією, яку він спричиняє. Таким чином:

1. Теплова дія. Вона означає нагрівання провідника. Теплова дія струму використовується в електронагрівальних приладах.
2. Хімічна дія. Вона виявляється, якщо пропустити струм через розчин кислот, лугів та солей. На електродах спостерігається виділення атомів(молекул), які входять до складу розчинів.
3. Магнітна дія. Провідник зі струмом стає подібним магніту.

Сила електричного струму – це величина, що характеризує упорядкований рух електричних зарядів та чисельно дорівнює кількості заряду, що переноситься через певну поверхню(поперечний переріз провідника) за одиницю часу:

Розглянемо провідник з площею поперечного перерізу S . Заряд кожної частинки q . В об'ємі провідника, обмеженому перерізами 1 та 2 міститься N частинок, де n –

концентрація частинок. Їх загальний заряд . Якщо частинки рухаються з середньою швидкістю , то за інтервал часу всі частинки, які містяться в об'ємі, що розглядається, пройдуть через поперечний переріз 2. Отже, сила струму дорівнює

Отже, сила струму залежить від заряду, що переноситься кожною частинкою, швидкості їх спрямованого руху та площі поперечного перерізу провідника.

У системі СІ одиниця сили струму є основною та носить назву Ампер.

Джерело струму, з'єднане дротами з різними електроприладами та споживачами електричної енергії, створює електричне коло.

Електричне коло заведено зображати за допомогою схем, в яких елементи електричного кола позначені спеціальними позначками. В таблиці наведені умовні позначення елементів електричного кола.

	Гальванічний елемент або акумулятор
	Батарея елементів або акумулятор
	З'єднання дротів
	Перетин дротів
	Затискачі для підключення приладу
	Ключ
	Лампа розжарювання
	Електричний дзвоник
	Резистор
	Конденсатор
	Котушка
	Нагрівальний елемент
	Плавкий запобіжник
	Реостат
	Штепсельне з'єднання

	Кнопка
	Вольтметр
	Амперметр

Електричний струм у різних середовищах.

Електричний струм у металах обумовлений упорядкованим рухом вільних електронів (електронів провідності). Позитивні іони у перенесенні заряду участі не беруть.

Електронна природа носіїв струму в металах пояснюється таким чином. Кристалічна гратка металу складається з позитивно заряджених іонів, розташованих у вузлах ґратки, та електронів, що рухаються між вузлами. Ці електрони – валентні електрони атомів металу, які залишили свої атоми. Вільні електрони здійснюють хаотичний рух по кристалу, вже не «пам'ятаючи», якому атому вони належали. При цьому сума всіх позитивних зарядів іонів ґратки дорівнює сумарному негативному заряду всіх вільних електронів. Тому метал залишається незарядженим або електронейтральний. Якщо на металічний зразок накласти електричне поле, то більшість вільних електронів починають рухатися уздовж поля. Тобто утворюється електричний струм.

Така теорія електропровідності називається електронною теорією металів.

Електричний струм в електролітах.

Електролітами називають речовини, в яких проходження електричного струму супроводжується електролізом. Електроліз - це виділення на електродах складових частин розчинених речовин.

В електролітах, що є водними розчинами кислот, лугів та солей перенесення заряду здійснюється іонами. Така провідність називається іонною.

Закон електролізу встановлений дослідним шляхом – М.Фарадеєм.

Маса речовини, що виділяється на електроді за час при проходженні електричного струму пропорційна силі струму та часу

Величина k називається електрохімічним еквівалентом даної речовини та виражають у кг/Кл .

Електрохімічний еквівалент чисельно дорівнює масі речовини, що виділяється на електродах при перенесенні іонами заряду

Електроліз застосовується для нанесення різних покриттів на металеві поверхні, які захищають їх від корозії.(нікелювання, хромування, обміднення). Використовується електроліз у гальванопластиці. Гальванопластика – це процес одержання відшарованих покриттів. Електролізом здійснюється очищення металів від домішок(мідь, алюміній).

Електричний струм у газах.

Процес проходження електричного струму через газ називають газовим розрядом. При кімнатних температурах гази практично не проводять електричний струм, оскільки складаються з нейтральних атомів, тобто є діелектриками.

При нагріванні або опроміненні ультрафіолетовим світлом, рентгенівськими променями або іншим видом випромінювання атоми газу отримують додаткову енергію, яка може привести до іонізації. Так, наприклад, при нагріванні за рахунок збільшення швидкості молекул частина з них при зіткненні одна з одною розпадаються на позитивно та негативно заряджені іони та електрони.

Провідність газів забезпечується як електронами, так і позитивно зарядженими іонами(на відміну від металів, де провідність електронна і на відміну від електролітів, де провідність іонна).

Рекомбінація- процес возз'єднання електрона з позитивним іоном – спостерігається. Якщо припинити дію іонізатора. Якщо зовнішнє поле відсутнє. То під дією іонізатора встановлюється рівновага між кількістю зникаючих іонів та знов утворених пар заряджених частинок.

Несамостійний розряд у газі, іонізованому будь – яким іонізатором, виникає в постійному полі та існує доти, доки існує зовнішній іонізатор.

Вольт- амперна характеристика цього розряду зображена на малюнку.

На ділянці 1 при зростанні поля, зростає сила струму, доти не досягне насичення 2. Це означає, що всі утворені при іонізації носії заряду витягуються полем – досягають електродів. Ділянка 3 відповідає» пробою» , тобто несамостійний розряд перетворюється

у самостійний розряд. При деякій напрузі, що залежить від роду газу та відстані між електродами запалюється самостійний розряд. Який не потребує більше зовнішнього іонізатора. Струм через трубку різко зростає. Причиною виникнення такого розряду є іонізація електронним ударом. При співударі атома з електроном, який розганяється електричним полем до енергії достатньої для іонізації атома, утворюються два електрони, які при своєму русі до аноду також розганяються та, зіштовхуючись на своєму шляху з іншими атомами, іонізують їх. І результаті чого виникає електронна лавина. Для забезпечення тривалого самостійного розряду. Крім іонізації електронним ударом, необхідна ще емісія(випускання) електронів з катода. Така емісія може бути забезпечена або за рахунок термоелектронної емісії з катода(випускання електронів з металу при нагріванні), або за рахунок вибивання електронів з катода позитивними іонами з великою кінетичною енергією. В газорозрядній трубці виникає плазма.

Плазма – вважається четвертим станом речовини, оскільки має низку інших властивостей, що відрізняють її від інших станів. Плазма має властивість квазінейтральності: майже точної рівності густини позитивних іонів та негативних електронів. Це пов'язане з великою рухомістю заряджених частинок. Завдяки якій будь – яке порушення цієї рівноваги, яке призводить до виникнення сильних полів. Швидко розсмоктується.

У плазмі легко збуджуються різні коливання та хвилі. Це пояснюється тим, що частинки плазми крім хаотичного руху(як у нейтральних газах), можуть брати участь ще й у колективних або упорядкованих рухах, оскільки між частинками плазми діють кулонівські сили, що існують між нейтральними атомами.

Чим більша температура плазми. Тим більша її провідність. При високій температурі провідність плазми наближається до надпровідності. Земля оточена плазмою - іоносферою(висота над Землею 100 – 300 км). Міжзіркове середовище також являє собою плазму дуже малої густини(приблизно 1 атом на 1 см кубічний).

Зірки, навпаки, складаються з повністю іонізованої плазми з дуже високою температурою. Власне кажучи, приблизно 99% речовини Всесвіту є плазмою.

Електричний струм у вакуумі.

Вакуум – середовище, що містить газ при тисках, істотно нижчих від атмосферного. В цьому стані молекули встигають пролетіти від стінки до стінки посудини, жодного разу не зіштовхнувшись.

Струм у просторі між двома електродами,запаєними у відкачану скляну трубку, можливий лише при введенні в цей простір заряджених частинок. Для цього використовують явище термоелектронної емісії, яке полягає у випусканні електронів нагрітими до високої температури тілами. Як емітер електронів використовується зазвичай нагрітий до високої температури катод. Біля нього утворюється електронна хмара, внаслідок чого катод заряджається позитивно, і частина електронів повертається на катод. За відсутності поля встановлюється рівновага. Кількість електронів, які залишили катод за одиницю газу, дорівнює кількості електронів, що повернулися на нього. Чим вища температура катода, тим більша електронна хмара. Якщо тепер електроди

підключити до джерела струму, спостерігатиметься однобічна провідність. Струм через трубку піде лише в тому випадку, якщо до холодного електрода _ анода – приєднати позитивний полюс джерела струму, а до катода – негативний. Електрони, залишаючи електронну хмару, прямують до аноду. При протилежному вмиканні джерела струму електричне поле відштовхує електрони знов до катода, і струму в колі немає.

Однобічна провідність використовується у вакуумних діодах, які застосовуються для випрямлення електричного струму поряд з напівпровідниковими діодами. Вакуум у балоні діода високий - тиск не більше 10^{-6} – 10^{-7} мм.рт.ст. Катод та анод металеві циліндри, зі спільною віссю. Катод покритий шаром лужноземельного оксиду барію. Це сприяє більшому виділенню електронів при нагріванні. Нагрівання катода здійснюється ізольованим провідником, розташованим всередині нього.

Література – В.С.Попов « Теоретична електротехніка» с.14 – 19.

Задача 1

Визначте швидкість (у мм\с) упорядкованого руху електронів у мідному проводі з площею поперечного перерізу 0, 25 мм при силі струму 1А. Вважайте, що кожний атом міді дає два електрони провідності.

Задача 2

Пучок електронів, розігнаних напругою 10 кВ влітає в плоский конденсатор, посередині між пластинами й паралельно до них. Довжина конденсатора 20 см. Відстань між пластинами 10 мм. Напруга між пластинами конденсатора дорівнює 20 В. Визначте відстань , на яку зміститься пучок під час вильоту з конденсатора.

Задача 3.

Визначте силу струму, насичення в газорозрядній трубці довжиною 45 см і площею поперечного перерізу 20 см, якщо її опромінюють ультрафіолетовими променями, що утворюють всередині трубки щосекунди в кожному кубічному сантиметрі газу $2,1 \cdot 10$ пар іонів.

Задача 4

Визначте час (у годинах) , який потрібен для покриття хрому завтовшки 36мкм. Електроліз проходить за густини струму 400А\М2. Валентність хрому 3.

Тема 5 Опір та провідність

Електричний опір - це фізична величина, що характеризує протидію провідника або електричного кола електричному струму.

Величина обернена до електричного опору називається електричною провідністю.

Одиниця опору називається Ом. Один Ом – це опір такого провідника, в якому при напрузі 1В сила струму дорівнює 1А.

Питомий опір.

Опір однорідного провідника постійного перерізу залежить від матеріалу провідника, його довжини та поперечного перерізу і може бути визначений за формулою

Де ρ - питомий опір речовини, з якої виготовлений провідник.

Питомий опір речовини – це фізична величина, що показує, який опір має виготовлений з цієї речовини провідник одиничної площі поперечного перерізу.

Величина обернена до питомого опору називається питомою провідністю.

В системі СІ одиницею питомого опору є $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а одиницею провідності – $1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Природа електричного опору наступна: згідно з класичною електронною теорією рух вільних носіїв зарядів в провідниках не зовсім вільний. В металевих провідниках електрони провідності стикаються з атомами і іонами, які роблять теплові коливання навколо своїх положень рівноваги, втрачають швидкість упорядкованого руху і віддають цим частинкам частину своєї кінетичної енергії. Потім електрони знову прискорюються електричним полем, знову стикаються з атомами, уповільнюються і т.д. Те ж саме має місце в рідких і газоподібних провідниках, де заряджені частки, які створюють електричний струм, стикаються з іншими частинками речовини, що рухаються без порядно. Результатом таких стикань є те, що частина енергії, що створюється в джерелі струму передається вільними зарядами, що рухаються направлено, часткам провідника і перетворюється в його нагрів.

Залежність опору від температури.

З підвищенням температури опір металів зростає. Це пов'язано з тим, що при підвищенні температури зростає амплітуда теплових коливань атомів і іонів метала, які знаходяться в вузлах кристалічної ґратки. Тому, чим вища температура, тим частіше вільні електрони стикаються з атомами і іонами, і тим більший опір провідника. При середніх температурах при нагріванні металічного провідника його питомий опір змінюється по закону

- Де
- питомий опір метала при температурі
 - питомий опір метала при нуль градусах
 - температурний коефіцієнт опору.

З цієї формули

Температурний коефіцієнт опору дорівнює зміні питомого опору провідника при його нагріванні на 1 градус по Цельсію до його питомого опору при нуль градусів по Цельсію. В СІ температурний коефіцієнт вимірюється в град.

У загальному випадку він залежить від температури, але якщо інтервал температур невеликий, то температурний коефіцієнт можна вважати незмінним.

Однак існують сплави, опір яких майже не змінюється при підвищенні температури(наприклад константан, манганін).

Опір електронів з підвищенням температури зменшується. Температурний коефіцієнт для розчинів електронів менше нуля.

Залежність опору провідника від температури використовується в термометрах опору.

При дуже низьких температурах опір кількох низьких металів скачком падає до нуля. Якщо, наприклад, охолодити дріт з твердої ртуті до температури більш низької, ніж 4,2 К і підтримувати цю температуру, то струм може існувати в замкненому колі із ртутного дроту без джерела струму протягом довгого часу. Це явище називають надпровідністю.

Температурна залежність опору надпровідників від температури має вигляд.

Перехід у надпровідний стан виявлений у декількох сотень металевих сплавів та у деяких сильно легованих напівпровідників. Існують також й органічні надпровідники та полімери.

У напівпровідників питомий опір залежить від стану речовини: при підвищенні температури значно падає. Залежність питомого опору напівпровідників від температури зображена на малюнку.

Це пов'язано з тим, що при підвищенні температури у напівпровідниковому кристалі збільшується число вільних носіїв заряду, так як атомам надається додаткова енергія, внаслідок чого електрони відриваються від « свого » атома.

Задача 1

При температурі 20 С опір лампочки з вольфрамовою ниткою дорівнює 2 Ом, в розжареному стані – 16,6 Ом. Знайти температуру накала нитки лампочки.

Задача 2

На скільки градусів треба підвищити температуру мідного провідника, взятого при температурі нуль градусів по Цельсію, якщо його опір зріс у 3 рази.

Задача 3

Два провідника - мідний та алюмінієвий мають однакову масу і площу перерізу. Яке відношення їх опорів?

Задача 4

Два залізні дроти мають однакову масу, але діаметр першої у 2 рази більше за діаметр другої. Знайти відношенні їх опорів.

Тема 6 Закон Ома. Аналіз формул закону Ома

Закон Ома для ділянки кола.

Сила струму на ділянці кола дорівнює відношенню напруги на цій ділянці до її опору. Таким чином, закон Ома виражає зв'язок між трьома величинами, що характеризують проходження електричного струму в колі – силою струму, напругою та опором.

Закон Ома виражається формулою $I = U/R$.

Закон Ома для ділянки кола, що не вміщує джерела струму, має вигляд

Так як U - різниця потенціалів між кінцями ділянки.

Закон Ома для ділянки кола, яке вміщує джерело струму, має вигляд

Де $U_{\text{джерела}}$ - різниця потенціалів.

Для розімкненого кола струм дорівнює нулю і згідно з законом Ома для ділянки кола з джерелом струму

Отже ЕРС джерела струму виміряється різницею потенціалів на його клеммах при розімкненому зовнішньому колі. Залежність сили струму від прикладеної різниці потенціалів на кінцях провідника називається вольт – амперною характеристикою провідника. Для будь – якого провідника існує своя ВАХ. Найпростіший вигляд має вольт – амперна характеристика металевих провідників, задана законом Ома, та розчинів електролітів. Знання ВАХ відіграє важливу роль при вивченні струму.

Закон Ома – це основа всієї електротехніки. З нього випливає :

- сила струму на ділянці кола зі сталим опором пропорційна напрузі на кінцях ділянки;
- сила струму на ділянці кола з незмінною напругою обернено пропорційна опором;

Щоб експериментально перевірити закон Ома для ділянки кола, складемо схему

Нехай джерелом струму є джерело з регульованою вихідною напругою, а опір кола – сталий. Тоді отримаємо

Тобто стала струму в металевих провідниках прямо пропорційна напрузі, прикладеної до кінців провідника.

Нехай джерелом струму є акумулятор(напруга стала), а опір кола змінний(магазин опорів). Тоді отримаємо

Видно, що сила струму обернено пропорційна опору кола при незмінній напрузі між кінцями кола.

Закон Ома для повного кола

Електричне коло складається з двох різних частин: внутрішньої або джерела струму і зовнішньої, яка з'єднує полюса джерела поза ним. Джерело струму, як і будь – який провідник, має опір, який називають внутрішнім опором та позначають r на відміну від зовнішнього опору кола R .

Щоб подолати зовнішній опір, одиничний електричний заряд витрачає енергію, яка називається напругою в зовнішньому колі і дорівнює $U = I \cdot R$. Щоб подолати внутрішній опір джерела, одиничний електричний заряд витрачає енергію $U_{\text{внутр.}} = I \cdot r$. Згідно з законом збереження енергії, енергія $IR + Ir$, витрачена одиничним зарядом, які пройшли замкнений шлях по всьому колу, дорівнює енергії, яку одиничний заряд отримав у джерелі струму за рахунок роботи сторонніх сил, тобто дорівнює електрорушійній силі. Так як сила струму у всіх частинах замкненого кола однакова, то $I(R+r) = E$.

Тоді $I = E / (R+r)$ – це формула закону Ома для повного кола.

Цей закон формулюється таким чином: сила струму в замкненому колі прямо пропорційна E джерела і обернено пропорційна сумі зовнішнього і внутрішнього опорів.

Закон Ома для густини постійного струму в металах(закон Ома в електронній теорії)

Густина постійного струму дорівнює добутку питомої електропровідності на напруженість електричного поля в даній точці металевого провідника зі струмом. Середня швидкість упорядкованого руху електронів в металі пропорційна напруженості електричного поля в даній точці провідника

Де e - абсолютне значення заряду електрона, m - його маса, τ - середній час вільного пробігу електрона.

В класичній електронній теорії електропровідності металів вважається, що вільні електрони в металевому провіднику під дією електричного поля прискорено рухаються без зіткнення від одного вузла кристалічної ґратки метала до іншого. Густина струму знаходиться по формулі

Отже, електропровідність метала в класичній електронній теорії

Задача 1

Батарея з ЕРС 16В замкнена на прилад. Сила струму в приладі 2А. Коефіцієнт корисної дії батареї 0,75. Знайти внутрішній опір джерела.

Задача 2

Під час виконання лабораторної роботи учень за допомогою вольтметра двічі визначив напругу на зовнішній ділянці електричного кола. Одного разу напруга була 3 В, якщо опір дорівнював 5 Ом, а іншого разу напруга становила 2,75 В, якщо опір дорівнював 2,5 Ом. Визначте у вольтах за даними досліду ЕРС джерела струму.

Задача 3

Під час виконання роботи учень отримав вольт – амперну характеристику джерела струму і побудував відповідний графік. Визначте за графіком внутрішній опір джерела струму, в омах.

Якщо продовжити графік до перетину його з віссю напруги на клемі джерела струму, отримаємо напругу за сили струму, який дорівнює нулю. Це є шукана ЕРС. Вона дорівнює 3 В. Якщо продовжити графік до перетинання з віссю сили струму, ми отримаємо значення сили струму за нульової напруги 1,2 А. Це струм короткого замкнення (опір дорівнює нулю), звідси $r = E/I_k$.

Задача 4

Сила струму в вольфрамовій нитці накаливання 0,2 А. Діаметр нитки 0,02 мм, температура горіння лампи 2000С. Знайдіть напруженість в нитці лампи.

Тема . Магнітне поле. Визначення та основні прояви поля.

Магнітне поле – одна з форм матерії(яка відрізняється від речовини), що існує в просторі, який оточує постійні магніти, провідники зі струмом та рухомі заряди. Магнітне поле разом з електричним полем утворює одне електромагнітне поле.

Магнітне поле не тільки створюється постійними магнітами, рухомими зарядами та струмами у провідниках, але й діє на них самих.

Взаємодія між провідниками зі струмом, тобто взаємодії між рухомими електричними зарядами називають магнітними, а сили, з якими провідники зі струмом діють один на одного – магнітними.

Струм в одному з провідників не може безпосередньо впливати на струм в іншому провіднику. Аналогічно випадку з нерухомими електричними зарядами, навколо яких існує електричне поле, був зроблений висновок, що магнітне поле, яке діє з деякою силою на інший провідник зі струмом, розміщений у цьому полі, або на постійний магніт. У свою чергу магнітне поле, створюване другим провідником зі струмом, діє на струм у першому провіднику.

Подібно до того, як електричне поле виявляється за його впливом на пробний заряд, внесений у це поле, магнітне поле можна виявити за орієнтуючою дією магнітного поля на рамку зі струмом невеликих (у порівнянні з відстанями, на яких магнітне поле помітно змінюється) розмірів.

Дроти, які підводять струм до рамки, необхідно розташувати близько один до одного, тоді результуюча сила, що діє з боку магнітного поля на ці дроти, дорівнюватиме нулю. Сили ж ,які діють на таку рамку зі струмом, будуть повертати її так, щоб провідник зі струмом опинився у площині рамки. При зміні напрямку струму в провіднику, рамка повернеться на 180 градусів.

Постійний магніт – це виріб з матеріалу, який є автономним(самостійним, ізольованим) джерелом постійного магнітного поля.

Магнітні властивості деяких природних мінералів були відомі вже в давньому світі. Так, є письмові свідчення більш ніж 2000- річної давнини про використання в Китаї природних постійних магнітів як компасів.

Природні магніти являють собою шматки магнітного залізняку(магнетиту), який складається з FeO (31 %)та Fe_2O_3 (69 %). Якщо такий шматок мінералу піднести до дрібних залізних предметів, вони до нього притягнуться.

Штучні постійні магніти виготовляють зі спеціальних сплавів, до яких входять залізо, нікель, кобальт та інші. Ці метали набувають магнітних властивостей(намагнічуються), якщо їх піднести до постійних магнітів. Тому, щоб виготовити з них постійні магніти, їх спеціально утримують у сильних магнітних полях, після чого вони самі стають джерелами постійного магнітного поля та здатні тривалий час зберігати магнітні властивості.

У кожного магніту є два полюси – це місця найбільшого згущення магнітних силових ліній(їх називають також лініями магнітного поля або лініями магнітної індукції поля). Один з полюсів заведено називають північним, інший південним. Якщо піднести два магніти один до одного однойменними полюсами, можна побачити, що вони відштовхуються, а якщо різнойменними – притягуються.

Застосування магнітів. Найдавнішим магнітним приладом є компас. У сучасній техніці магніти використовуються дуже широко : в електродвигунах, у радіотехніці, в електровимірвальній апаратурі.

Магнітне поле Землі.

Земна куля є магнітом. Як у будь – якого магніту, у неї є своє магнітне поле та свої магнітні полюси. Саме тому стрілка компасу орієнтується у певному напрямку. Зрозуміло, куди саме має вказувати північний полюс магнітної стрілки, адже притягуються різнойменні полюси. Тому північний полюс магнітної стрілки вказує на Південний магнітний полюс Землі. При наближенні до Північного географічного полюса силові лінії поля Землі все під більшим кутом нахиляються до горизонту і в області Південного магнітного полюса стають вертикальними. Північний магнітний полюс Землі знаходиться поблизу Північного географічного полюсу Землі. Тут силові лінії виходять із Землі.

Інакше кажучи, магнітні полюси Землі не збігаються з її географічними полюсами, тому напрям магнітної стрілки не збігається з напрямом географічного меридіана, а магнітна стрілка лише приблизно показує напрям на північ. На стрілку компаса впливають також деякі природні явища, наприклад, магнітні бурі, які супроводжуються викидом з поверхні Сонця потоків заряджених частинок, зокрема, електронів та протонів. Ці потоки, які рухаються з великою швидкістю, створюють своє магнітне поле, що взаємодіє з магнітним полем Землі.

На земній кулі(крім короткочасних змін магнітного поля) існують області, в яких спостерігається постійне відхилення напрямку магнітної стрілки від напрямку магнітного поля Землі. Це області магнітної аномалії. Одна з найбільших таких областей Курська магнітна аномалія. Причиною таких аномалій є величезні поклади залізної руди на порівняно невеликій глибині.

Земне магнітне поле захищає поверхню Землі від космічного випромінювання, дія якого на земні організми є руйнівною. Астрономи встановили, що у Місяця та Венери відсутнє магнітне поле, а у Марса воно дуже слабе.

Основні характеристики магнітного поля.

Намагнічу вальна сила в системі СІ приймається рівною силі струму $F=I$, (якщо струм проходить по дроту) та $F=Il$, якщо струм проходить по котушці з кількістю витків.

Напрямок магнітного поля залежить від напрямку струму.

Напрямок намагнічу вальної сили знаходиться по правилу правої руки:

Якщо обхватити котушку правою рукою таким чином, щоб чотири пальці її були розташовані в напрямку струму у витках котушки , тоді великий палець віто гнутий на 90 градусів покаже її напрям.

Напруженість магнітного поля

$H=Il$, де

l - довжина провідника.

Магнітна індукція – це векторна фізична величина, що характеризує магнітне поле.

Індукція магнітного поля в даній точці дорівнює відношенню максимальної сили, що діє на провідник зі струмом до довжини провідника та сили струму в провіднику, розміщеному в цій точці.

$B=F/Il$

Чим більша магнітна індукція в даній точці поля, тим з більшою силою діятиме поле в цій точці на магнітну стрілку або рухомий електричний заряд.

Одиницею магнітної індукції в СІ є Тесла (Тл).

Напрямом вектора магнітної індукції вважають:

1. напрям від південного полюса до північного полюса магнітної стрілки, що вільно встановлюється в магнітному полі.
2. напрям позитивної нормалі до замкнутого контуру зі струмом, який вільно встановлюється в магнітному полі. Позитивною вважається нормаль спрямована в бік переміщення вістря свердлика(з правою нарізкою), рукоятку якого обертають за напрямом струму в рамці (Правило правого гвинта або свердлика.)

Лінії магнітної індукції – це уявні лінії, які дають змогу наочно подати магнітне поле.

Лініями магнітної індукції або магнітними силовими лініями, або просто магнітними лініями називають лінії, дотичні до яких у будь – якій точці збігаються з напрямом вектора магнітної індукції в цій точці поля.

Картина силових ліній може бути легко отримана за допомогою залізних стружок, насипаних на картон.

Лінії магнітної індукції є замкненими. Це свідчить про те, що в природі немає магнітних зарядів. Поля, силові лінії яких замкнені, називають вихровими полями. Тобто магнітне поле називають вихровим. Цим воно відрізняється від електричного поля, створеного зарядами(Силові лінії електричного поля мають початок і кінець – починаються на додатних зарядах і закінчуються на від’ємних зарядах.

Синусоїдний струм та основні величини які його характеризують

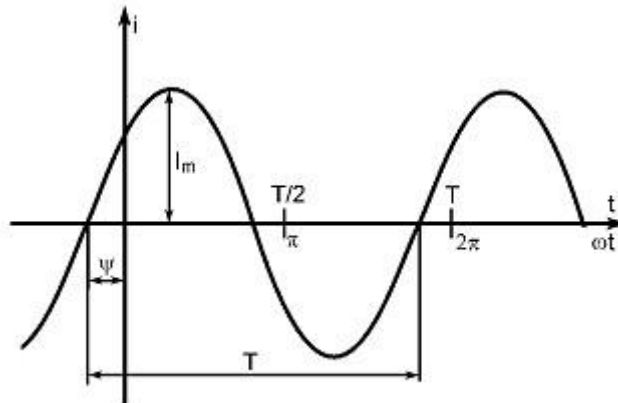


Рис.1.

Синусоїдний **струм** - це струм, який змінюється за синусоїдним законом (рис.1):

$$i(t) = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \psi\right) = I_m \sin(\omega \cdot t + \psi) \quad i(t) - \text{миттєве значення струму.}$$

Максимальне значення функції I_m називається **амплітудним значенням** струму або **амплітудою**.

Період T - це час, за який здійснюється одне повне коливання. **Частота** f є величина обернена до періоду (або кількість періодів за одиницю часу):

$$f = 1/T \quad [\text{Гц}]$$

Кутова частота ω - це швидкість зміни фази (кута):

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi/T \quad [\text{рад/сек}]$$

Аргумент синусоїди $((2\pi/T) \cdot t + \psi) = (\omega \cdot t + \psi)$ називається **фазою**. Фаза характеризує стан коливання у певну мить часу t . Фаза з плином часу безперервно зростає. Після її збільшення до 2π весь цикл зміни струму повторюється.

Початкова фаза ψ визначається від миті переходу з від'ємних значень функції до додатних і до початку координат. Якщо $\psi < 0$, то початок синусоїди зсунутий вправо, а для $\psi > 0$ - вліво.

Косинусоїду можна розглядати як синусоїду з початковою фазою $\psi = \pi/2$, тобто:

$$i(t) = I_m \cos(\omega \cdot t + \psi_1), \quad \text{де } \psi_1 = \psi - \pi/2$$

Будь-яка функція, що змінюється за синусоїдою, визначається трьома величинами:

- амплітудою;
- кутовою частотою;

- початковою фазою.

За аргумент функції може бути прийнятий час t , або відповідно, кут ωt . Аргументу t відповідає період T , а аргументу ωt — період $\omega t = 2\pi$.

Якщо аргумент ωt має вираз у радіанах, то початкова фаза ψ також повинна бути виражена у радіанах, якщо ωt має вираз у градусах (період 360°), то й початкова фаза ψ — у градусах.

Середнє та діюче значення функцій, що змінюються за синусоїдою

Середнє значення періодичної функції $f(t)$ за період T визначається за формулою:

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

У випадку синусоїдної функції середнє значення за період дорівнює нулю. Тому для синусоїдних функцій використовують поняття середнього за модулем (середнього випрямленого, середнього за половину періоду) значення, яке визначають за формулою:

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{2I_m}{\omega \cdot T} (-\cos \omega \cdot t) \Big|_0^{T/2} = \frac{2I_m}{\pi} \approx 0,637 I_m$$

Аналогічно для визначається середнє випрямлене значення для $e(t)$ та $u(t)$.

Теплова дія струму пропорційна квадрату струму, а тому про величину струму звичайно судять по **діючому** (середньоквадратичному, ефективному) значенню за період:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m$$

За один період змінного струму у провіднику з опором R виділяється теплова енергія:

$$W = \int_0^T R i^2(t) dt = R \cdot T \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = R \cdot I^2 \cdot T$$

Теплова енергія, що виділяється за той же час постійним струмом I_0 буде дорівнювати $R \cdot I_0^2 \cdot T$.

Якщо порівняти теплову дію постійного та змінного струмів, то отримаємо:

$$R \cdot I^2 \cdot T = R \cdot I_0^2 \cdot T$$

Звідки витікає: $I = I_0$.

Діюче значення змінного струму дорівнює такому постійному струму, який проходячи через опір R за період T виділяє ту саму кількість тепла, що й цей змінний струм. Якщо спеціально не обумовлюється, то під струмом, напругою, ЕРС розуміють їх діючі значення.

Для характеристики змінних сигналів використовують також **коефіцієнт амплітуди** та **коефіцієнт форми**:

$$K_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} \quad \text{- коефіцієнт амплітуди;}$$

$$K_f = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \quad \text{- коефіцієнт форми.}$$

Для несинусоїдного струму ці коефіцієнти мають інші значення.

Зображення синусоїдних функцій часу векторами та комплексними числами

Тригонометрична форма розрахунку кіл синусоїдного **струму** може застосовуватися лише для простіших електричних кіл. Для більш складних електричних кіл тригонометричний метод розрахунку стає трудомістким. Потрібен метод, який дозволяє розраховувати кола змінного струму в алгебраїчній формі аналогічно колам постійного струму. Таким зручним розрахунковим методом є метод комплексних амплітуд (комплексний, символічний). Цей метод ґрунтується на заміні синусоїдних функцій обертовими векторами.

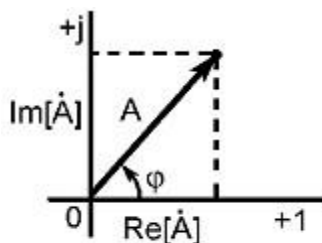


Рис.2.

Будь-яка точка на комплексній площині визначається радіус-вектором цієї точки (рис.2). У показниковій (полярній) формі запису:

$$\vec{A} = A e^{j\varphi} = A \angle \varphi, \quad j = \sqrt{-1},$$

де A - модуль; φ - аргумент (**фаза**).

За формулою Ейлера можна перейти від показової форми запису до алгебраїчної:

$$\vec{A} = A \cos \varphi + j \cdot A \sin \varphi = \operatorname{Re} \left[\vec{A} \right] + j \operatorname{Im} \left[\vec{A} \right];$$

$$A = \sqrt{\operatorname{Re}[A]^2 + \operatorname{Im}[A]^2};$$

$$\psi = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[A]}{\operatorname{Re}[A]}, & \operatorname{Re}[A] \geq 0; \\ \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[A]}{\operatorname{Re}[A]} \pm \pi, & \operatorname{Re}[A] < 0. \end{cases}$$

Вектор, який обертається у додатному напрямку (проти ходу годинникової стрілки) з кутовою швидкістю ω (рис.3) може бути виражений таким чином:

$$A e^{j(\omega \cdot t + \varphi)} = A e^{j \cdot \varphi} e^{j \cdot \omega \cdot t} = \overset{\square}{A} e^{j \cdot \omega \cdot t},$$

де $\overset{\square}{A} = A e^{j \varphi}$ - **комплексна амплітуда**, що зображує цей вектор у мить $t = 0$. Це комплексна величина, яка не залежить від часу, а її модуль та аргумент дорівнюють відповідно амплітуді та початковій фазі заданої синусоїдної функції.

Множник $e^{j \omega t}$ є **оператором обертання (обертаний множник)**. Множення комплексної амплітуди $\overset{\square}{A}$ на $e^{j \omega t}$ означає поворот вектора $\overset{\square}{A}$ на кут ωt у додатному напрямку.

Зобразимо комплексну функцію $A e^{j(\omega t + \varphi)}$ у тригонометричній формі:

$$A e^{j(\omega t + \varphi)} = A \cos(\omega t + \varphi) + j A \sin(\omega t + \varphi).$$

Таким чином, синусоїдна функція $f(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ може розглядатися як уявна частина комплексної функції $A e^{j(\omega t + \varphi)}$ або як проекція обертового вектора на уявну вісь. Умовно це записують таким чином:

$$A \sin(\omega t + \varphi) = \operatorname{Im} \left[\overset{\square}{A} e^{j \cdot \omega \cdot t} \right].$$

Аналогічно, косинусоїдна функція $A \cos(\omega t + \varphi)$ може розглядатися як дійсна (реальна) частина комплексної функції:

$$A \cos(\omega \cdot t + \varphi) = \operatorname{Re} \left[\overset{\square}{A} e^{j \cdot \omega \cdot t} \right].$$

Якщо синусоїдні функції мають одну й ту саму частоту, то відповідні до цих функцій вектори обертаються з однаковою кутовою швидкістю, а тому кути між ними зберігаються незмінними.

Розглянемо дві синусоїдні функції, що мають однакову частоту ω :

$$u_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \psi_1) \quad \text{та} \quad u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \psi_2).$$

Функція $u_1(t)$ випереджає по фазі $u_2(t)$, причому фазовий зсув дорівнює різниці початкових фаз (рис.4, а):

$$\varphi = \psi_1 - (-\psi_2) = \psi_1 + \psi_2.$$

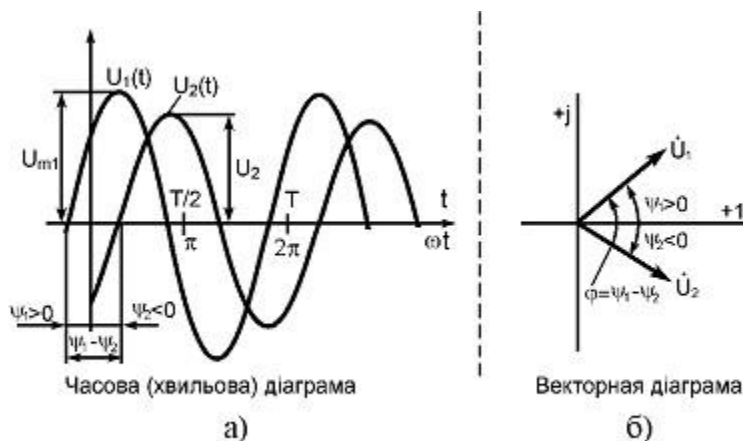


Рис.4

Діаграма, яка зображує сукупність векторів, побудованих з урахуванням їх взаємної орієнтації по фазі, називається векторною діаграмою, а криві миттєвих значень - часовою (хвильовою) діаграмою.

Приклад :

Миттєве значення струму:

$$i(t) = 8 \sin(\omega \cdot t + 20^\circ) \text{ A}.$$

Записати вираз для комплексної амплітуди цього струму:

$$\underline{I}_m = 8 \cdot e^{j20^\circ} \text{ A} = 8 \angle 20^\circ \text{ A}.$$

Комплексна **амплітуда** напруги $\underline{U}_m = 100 \angle e^{\frac{j\pi}{6}} \text{ B}$. Записати миттєве значення напруги:

$$u(t) = 100 \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{6}\right) \text{ B}.$$

Додавання та віднімання синусоїдних функцій на комплексній площині

Нехай необхідно знайти суму двох струмів $i_1(t)$ та $i_2(t)$ однакової частоти. Їх сума дає деякий струм тієї ж частоти:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) = I_{m1} \sin(\omega \cdot t + \psi_1) + I_{m2} \sin(\omega \cdot t + \psi_2) = I_m \sin(\omega \cdot t + \psi)$$

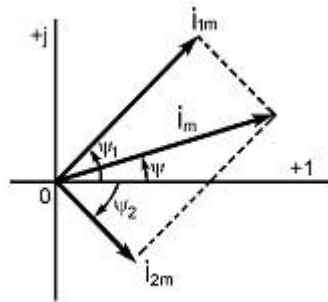


Рис.5

Необхідно визначити амплітуду I_m та початкову фазу ψ струму $i(t)$.
Зобразимо на комплексній площині струми $i_1(t)$ та $i_2(t)$ за допомогою відповідних векторів (рис.5): $\vec{I}_{m1} = I_{m1} \cdot e^{j\psi_1}$ та $\vec{I}_{m2} = I_{m2} \cdot e^{j\psi_2}$.

Геометрична сума векторів $\vec{I}_{m1}$ та $\vec{I}_{m2}$ дає комплексну амплітуду сумарного струму: $\vec{I}_m = I_m e^{j\psi}$.

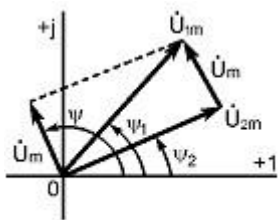


Рис.6

Для визначення різниці двох ЕРС, напруг або струмів необхідно виконати віднімання відповідних векторів на комплексній площині:

$$u(t) = u_1(t) - u_2(t) = U_{m1} \sin(\omega \cdot t + \psi_1) - U_{m2} \sin(\omega \cdot t + \psi_2) = U_m \sin(\omega \cdot t + \psi)$$

Миттєва потужність. Активні та реактивні опори

Проходження синусоїдних струмів по ділянках електричного кола супроводжується споживанням енергії від джерел. Швидкість надходження енергії до електричного кола характеризується потужністю. Миттєвим значенням потужності (миттєвою потужністю) називають добуток миттєвого значення напруги $u(t)$ на ділянці кола на миттєве значення струму $i(t)$, який проходить по цій ділянці:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

Миттєва потужність є функцією часу.

Пасивними елементами електричних кіл синусоїдного струму є активний опір R , індуктивність L та ємність C . Термін «опір» для кіл синусоїдного струму, на відміну від кіл постійного струму, недостатньо повний, оскільки опір змінному струму чинять не тільки ті елементи кола, в яких виділяється енергія у вигляді теплоти (їх називають *активними опорами*), але й ті елементи кола, в яких енергія у вигляді теплоти не виділяється, але періодично накопичується у електричному або магнітному полях. Такі елементи кола називають реактивними, а їх опори змінному струму - *реактивними опорами* (опори індуктивностей та ємностей).

Закон повного струму.

Властивості і застосування феромагнітних матеріалів.

1. Закон повного струму.
2. Намагнічування феромагнітних матеріалів.
3. Магнітний гістерезис.
4. Властивості феромагнітних матеріалів.
5. Магніто-м'які та магніто-тверді матеріали.

Література: 1. Ф.Є. Євдокимов

Теоретичні основи електротехніки

Київ-Донецьк "Вища школа" 1983 р.

стр.146-152

1) Введення поняття про магнітну проникність речовини дає змогу всі формули, добуті раніше для магнітного поля у вакуумі, застосувати і для магнітного поля в речовині, замінивши в них магнітну сталу μ_0 магнітною проникністю μ_a . Про таку можливість свідчить повна аналогія формул:

$$B_0 = \mu_0 H$$

$$B = \mu_a H$$

Ця обставина разом з поняттям про напруженість магнітного поля є основою для іншого формулювання закону повного струму.

У формулі:

$$\int_l B_l dl = \mu_0 \sum I$$

Замість μ_0 запишемо μ_a , а замість магнітної індукції підставимо рівнозначну величину:

$$B_l = H_l \mu_a, \text{ дістанемо:}$$

$$\boxed{\int H_l dl = \sum I} \quad (192)$$

Останнє рівняння виражає закон повного струму:

Циркуляція вектора напруженості магнітного поля по замкненому контуру дорівнює повному струмові, що пронизує поверхню, обмежену цим контуром.

У тих випадках, коли напруженість магнітного поля має однакове значення по всьому контуру, а вибраний контур збігається з лінією магнітної індукції рівняння (192) має простіший вигляд:

$$Hl = \sum I \quad (193)$$

а для котушок:

$$Hl = IN \quad (194)$$

Якщо контур містить кілька ділянок з різними значеннями напруженості поля $(H_1, H_2, \dots, H_n)$, але в межах кожної ділянки напруженість не змінюється, то рівняння (194) можна записати так:

$$\sum_1^n H_n l_n = \sum_1^n I_n N_n \quad (195)$$

де n – номер ділянки контуру.

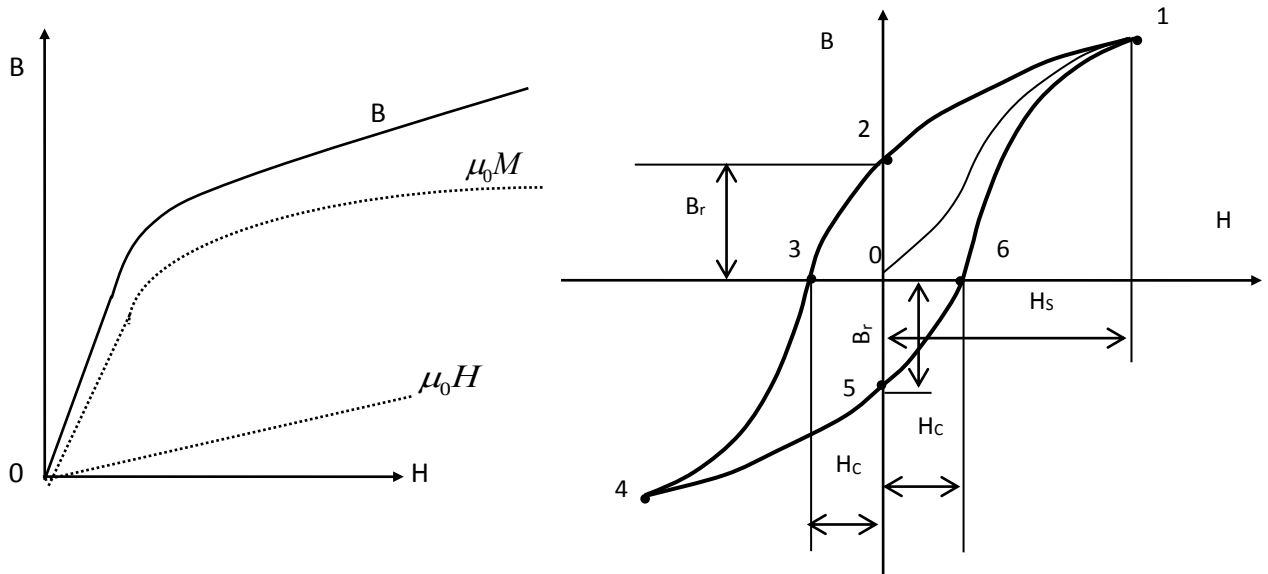
У такому виразі закон повного струму нагадує другий закон Кірхгофа і застосовується при розрахунку магнітних кіл.

2) Із зростанням напруженості поля H магнітна індукція B збільшується за законом:
 $B = \mu_0(M + H)$

Графік $B(H)$, що відповідає початковому намагнічуванню називається кривою початкового намагнічування (мал. 68). Там же подано залежність від напруженості поля обох складових $\mu_0 M$ і $\mu_0 H$, з яких складається магнітна індукція у феромагнітному осерді.

Діставши стан магнітного насичення, зменшимо напруженість зовнішнього магнітного поля H . Магнітна індукція зменшується за кривою 1-2 (мал. 68б), яка не збігається з кривою початкового намагнічування (крива 0-1). При $H = 0$ магнітна індукція має залишкове значення B_r .

Розмагнічування осердя немов запізнюється порівняно із зменшенням напруженості поля. Це явище називається магнітним гістерезисом.



Малюнок 68. Залежність магнітної індукції і намагніченості від напруженості поля (а) та графік циліндричного примагнічування феромагнітного осердя (б).

3) Змінюючи напрям струму в котушці а значить і напрям зовнішнього поля в осерді, збільшимо напруженість поля (вектор H змінив напрям). Магнітна індукція зменшиться до нуля (відрізок кривої 2-3), а потім змінить напрям на зворотний. Напруженість поля H , необхідну для ліквідації поля в осерді, називають коерцитивною силою.

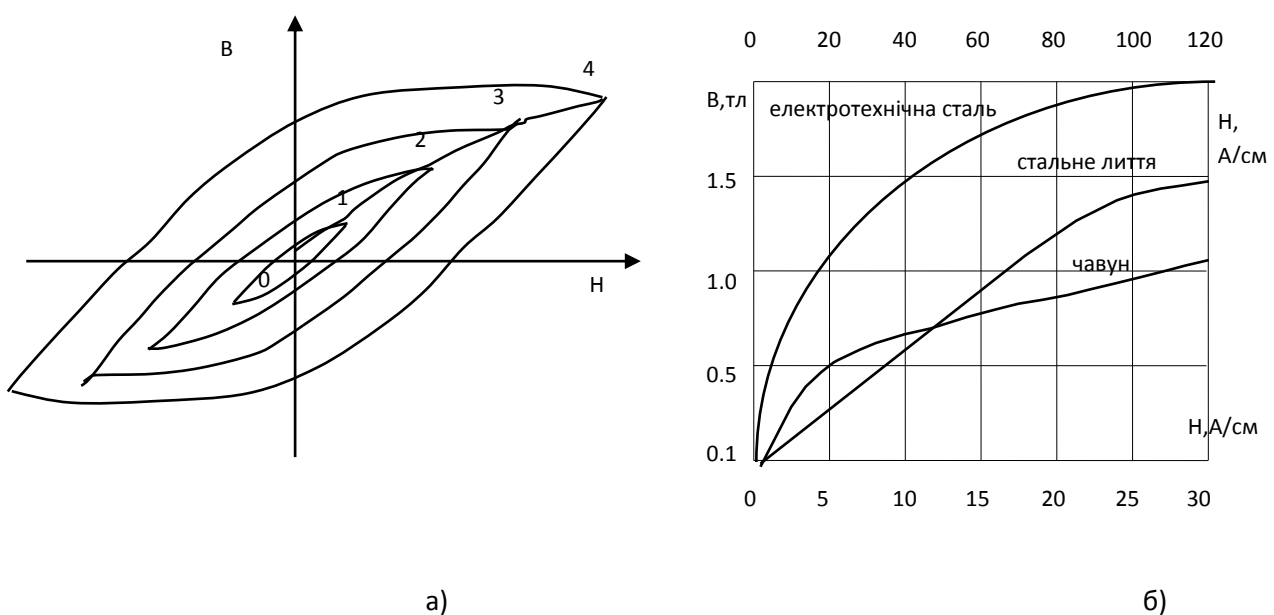
В точці 3 зовнішнє поле скомпенсувало залишкове поле намагніченості осердя ($-H_c = M$). Надалі результуюче поле в осерді змінює напрям і посилюється, поки не настане насичення (ділянка 3-4). Аналогічно можна добути дані і накреслити нижню частину графіка 4-5-6-1.

Утворену замкнену криву $B(H)$ називають петлею магнітного гістерезису.

Циклічне перемагнічування речовини в ділянці значень B і H , менших від тих, які відповідають повному намагніченню, теж утворює петлю гістерезису, повністю зосереджену всередині граничної петлі.

Ряд таких петель гістерезису показано на (мал. 69а). Криву 0-1-2-3-4, проведену через вершини усіх петель гістерезису, називають основною кривою намагнічування.

Основну криву намагнічування використовують при технічних розрахунках магнітних систем. На (мал. 69б) зображено основні криві намагнічування деяких феромагнітних матеріалів.



Малюнок 69. Петлі магнітного гістерезису (а) та основні криві намагнічування феромагнітних матеріалів (б).

4) На підставі досвіду намагнічування і перемагнічування феромагнітних матеріалів можна сформулювати основні їхні властивості:

Феромагнітні матеріали легко й сильно намагнічуються. Відносна проникність μ_r досягає значень 10^5 і вище.

Із зростанням напруженості зовнішнього магнітного поля намагніченість і магнітна індукція збільшується, проте ця залежність нелінійна. Це означає, що магнітна сприйнятливість χ і магнітна проникливість μ_r – не сталі величини, а залежать від намагніченості M .

Починаючи з деякої напруженості поля H при її збільшенні відбувається магнітне насичення, тобто такий стан феромагнітних речовин, при якому зростання напруженості поля не призводить до збільшення намагніченості.

При зменшенні напруженості поля H , після досягнення стану насичення, намагніченість і магнітна індукція зменшуються. Проте M і B відрізняються від тих, які було зафіксовано для однакових H при збільшенні напруженості.

При ліквідації зовнішнього поля ($H = 0$) спостерігається залишкова намагніченість (M і B не дорівнюють нулю).

При збільшенні напруженості поля H в зворотньому напрямку відбувається спочатку розмагнічування намагніченого зразка, а потім намагнічування в зворотньому напрямі (M і B змінюють знак) до насичення.

При циклічному перемагнічуванні з певною частотою феромагнітна речовина нагрівається, що свідчить про витрату енергії на перемагнічування.

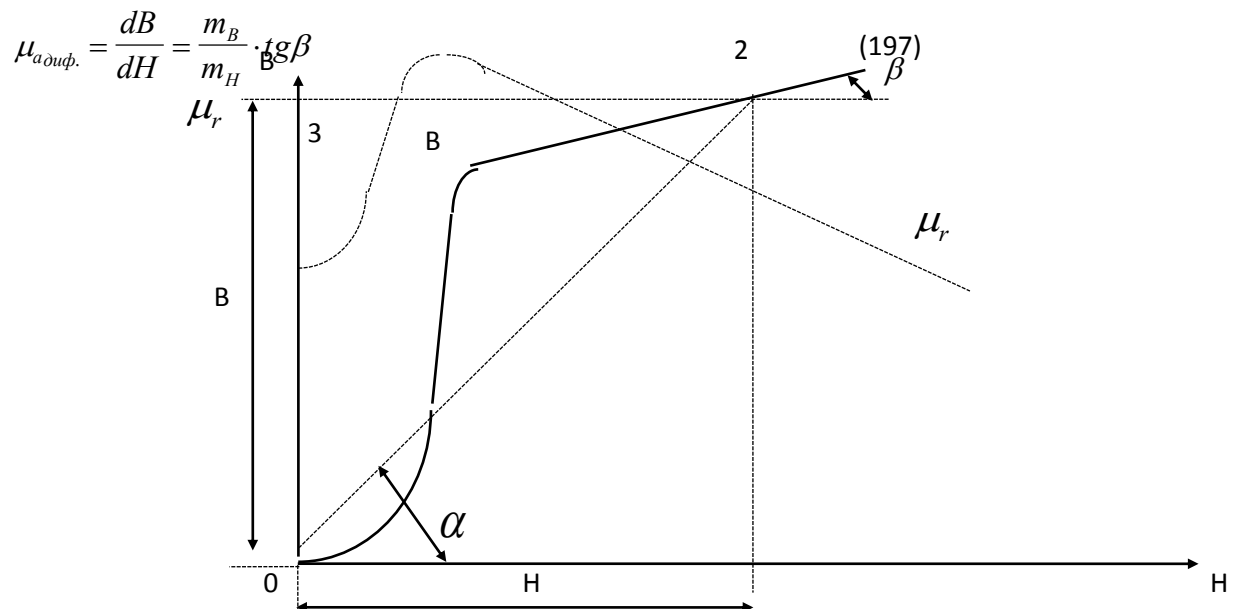
Абсолютна проникність феромагнітної речовини визначається відношенням у кожній точці основної кривої намагнічування (мал. 70) відношенням:

$$\mu_a = \frac{B}{H} = \frac{m_B}{m_H} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (196)$$

де m_B, m_H – масштаби по осях координат.

Магнітна проникність, яка визначається цим відношенням, називається статичною.

Крім статичної μ_a , визначають диференціальну магнітну проникність ($\mu_{a \text{ диф.}}$), яка пропорційна тангенсу кута нахилу дотичної до основної кривої намагнічування в кожній точці:



Малюнок 70. Визначення магнітної проникності.

5) Для всіх феромагнітних матеріалів зазначені властивості є загальними, проте виявляються вони по-різному в залежності від їх хімічного складу.

В зв'язку з цим розрізняють дві основні групи феромагнітних матеріалів: магніто-м'які і магніто-тверді.

Магніто-тверді матеріали мають великі значення залишкової магнітної індукції і коерцитивної сили, широку петлю гістерезису. До таких матеріалів відносять хромовольфрамкові і хромомолібденові сталі ($B_r = 1$ Тл, $H_C = 60$ А/см), сплав алніко (Al, Ni, Co) та ін.

Для магніто-м'яких матеріалів характеристиками є велика магнітна проникність і мала коерцитивна сила (вузька петля магнітного гістерезису). До них належать електротехнічна сталь, чисте електротехнічне залізо, електротехнічний чавун, пермалой. Вони застосовуються для обладнання магнітних кіл електричних машин, генераторів, електромагнітів.

САМОІНДУКЦІЯ. ІНДУКТИВНІСТЬ. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СТРУМУ

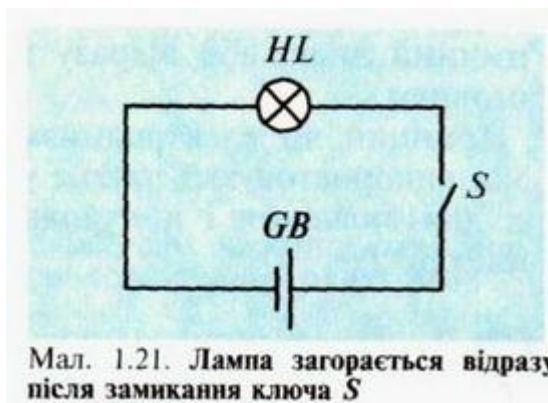
САМОІНДУКЦІЯ

Кожен провідник, у якому існує електричний струм, має «власне» магнітне поле. Це поле виявляється в момент, коли замикається електричне коло і в провіднику з'являється електричний струм. Якщо індукція магнітного поля перед замиканням кола дорівнювала нулю ($B_0 = 0$), то через деякий час після замикання вона матиме певне значення B , відмінне від нуля. Отже, момент замикання електричного кола можна вважати моментом зміни магнітного потоку. А будь-яка зміна магнітного потоку, за законом електромагнітної індукції, зумовлює появу вихрового електричного поля, яке спричинює появу ЕРС в усіх замкнутих провідниках, які знаходяться в цьому полі. Не може бути винятком і провідник, який є «джерелом» цього поля. Вихрове електричне поле і в ньому індукує ЕРС індукції.

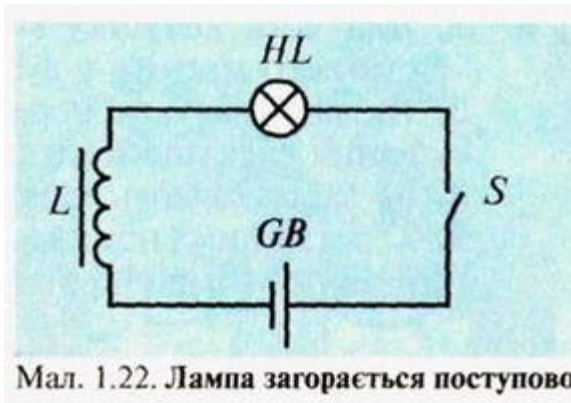
Явище самоіндукції виявив Д. Генрі у 1832 р.

При замиканні електричного кола спостерігається електромагнітна індукція

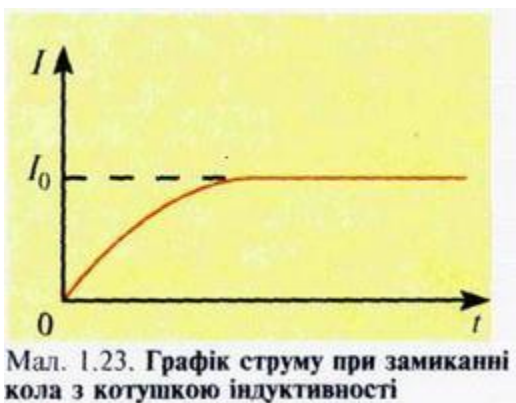
Складемо електричне коло з джерела струму GB , вимикача S та електричної лампочки HL (мал. 1.21).



Якщо замкнути коло, уважно спостерігаючи за лампочкою, то побачимо, що лампочка засвітиться практично миттєво. Якщо ж у коло послідовно з лампочкою ввімкнути котушку із залізним осердям (мал. 1.22),



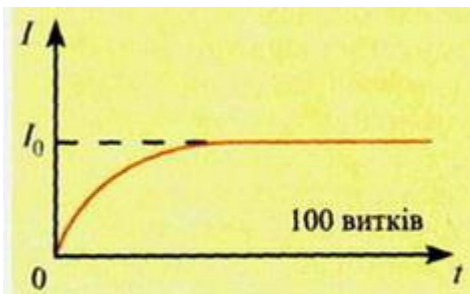
то процес встановлення струму в колі проходитиме інакше. Після замикання кола яскравість свічення нитки розжарення лампочки збільшуватиметься поступово. Це засвідчує, що і струм у колі зростає поступово впродовж певного часу. Хід цього процесу ілюструє графік, наведений на мал. 1.23.



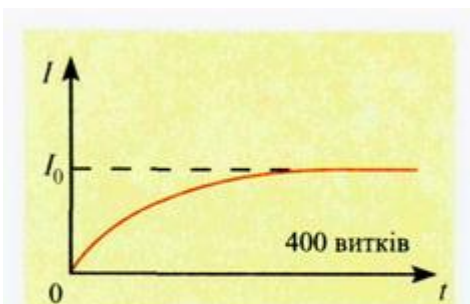
Зрозуміти результати досліду можна, пригадавши правило Ленца, згідно з яким ЕРС, індукована у провіднику вихровим електричним полем, має знак, протилежний знаку ЕРС джерела струму. І лише робота сторонніх сил у джерелі струму поступово зменшує швидкість наростання напруженості індукованого електричного поля і виникнення ЕРС індукції. Оскільки зміна магнітного потоку і явище електромагнітної індукції відбуваються одночасно в одному колі, то на відміну від попередніх випадків це явище називають самоіндукцією. Розрахувати значення ЕРС самоіндукції можна, застосувавши закон електромагнітної індукції:

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

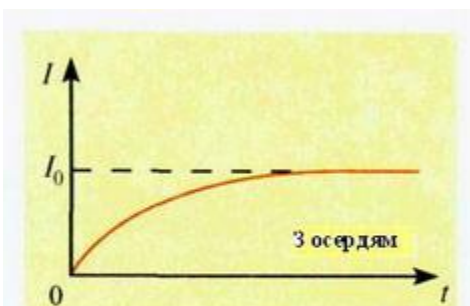
Дослідження явища самоіндукції показали, що значення ЕРС самоіндукції залежить від параметрів електричного кола. На мал. 1.24—1.26 наведено графіки, які ілюструють процес встановлення струму в колах із різними котушками.



Мал. 1.24. Графік струму при замиканні кола з котушкою індуктивності (100 витків)



Мал. 1.25. Графік струму при замиканні кола з котушкою індуктивності (400 витків)



Мал. 1.26. Графік струму при замиканні кола з котушкою індуктивності (400 витків)

Неважко помітити, що струм у колі, в якому є котушка, що має 100 витків (мал. 1.24), наростає швидше, ніж у колі, в яке ввімкнено котушку із 4000 витків, і має такий самий опір R (мал. 1.25). На процес встановлення струму в колі істотно впливає феромагнітне осердя (мал. 1.26).

Оскільки ЕРС самоіндукції протидіє ЕРС джерела струму, то за результатами дослідів, які ілюструють мал. 1.24—1.26, можна дійти висновку, що ЕРС самоіндукції залежить від характеристик котушки, ввімкненої в електричне коло. Однією з таких характеристик є індуктивність.

Фізичну величину, яка характеризує електромагнітні властивості котушки і є визначальною в процесі самоіндукції, називають індуктивністю.

Індуктивність є індивідуальною характеристикою не лише котушки, а й будь-якого провідника. Тому загалом говорять про індуктивність провідника.

Спосіб розрахунку значення індуктивності ґрунтується на тому, що магнітний потік у котушці зі струмом пропорційний силі струму в ній. У математичній формі це записують формулою

$$\Phi = LI,$$

де Φ — магнітний потік у котушці; I — сила струму в ній; L — стала для даної котушки величина.

Звідси зміна магнітного потоку дорівнюватиме:

$$\Delta\Phi = L\Delta I.$$

Магнітний потік котушки пропорційний силі струму в ній

З урахуванням отриманої залежності, закон електромагнітної індукції для випадку самоіндукції можна записати так:

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t},$$

звідси

$$L = \left| \frac{\mathcal{E}_{si} \Delta t}{\Delta I} \right|.$$

Залежність між величинами, які описують процес електромагнітної індукції, дає змогу встановити одиницю вимірювання індуктивності.

Якщо внаслідок зміни сили струму в провіднику на 1 А за 1 с ньому індукується ЕРС самоіндукції 1 В, то цей провідник має індуктивність 1 генрі (1 Гн).

Одиниця індуктивності названа на честь американського фізика Д. Генрі, який зробив вагомий внесок у розвиток науки про електромагнітні явища.

Одиниця 1 генрі досить велика, тому застосовують її частинки:

1 Гн = 1000 мГн = 1 000 000 мкГн,
або 1 мкГн = 10^{-3} мГн = 10^{-6} Гн.

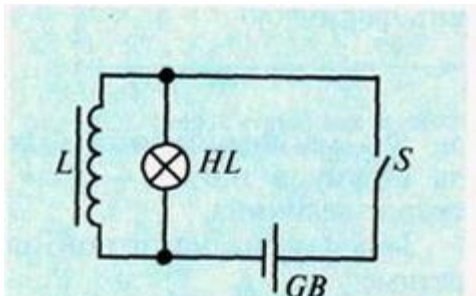
Індуктивність котушки визначається її фізичними характеристиками

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}$$

Оскільки індуктивність описує електромагнітні властивості провідника, то вона залежить від його форми, розмірів та магнітної проникності середовища, в якому знаходиться провідник.

Явище самоіндукції спостерігається і при розмиканні електричного кола.

Складемо електричне коло з джерела струму, вимикача, котушки і лампи розжарення. Лампу розжарення, опір якої значно менший за опір котушки, увімкнемо паралельно котушці, (мал.1.27).



Мал. 1.27. Схема електричного кола з котушкою індуктивності і лампою розжарення

Якщо замкнути коло, то нитка розжарення буде розжарюватись і випромінювати світло. Струм проходитиме і в котушці, створюючи магнітний потік, який дорівнює $\Phi = LI$.

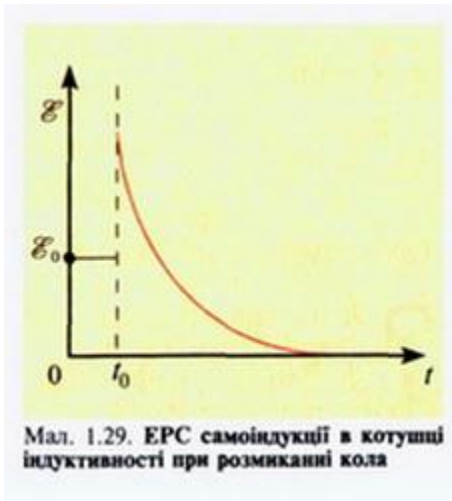
Якщо тепер розімкнути коло, то лампочка гаснутиме поступово. Це явище також є наслідком самоіндукції. У результаті зміни магнітного потоку при розмиканні кола з'являється ЕРС самоіндукції, яка підтримує в котушці струм попереднього напрямку, оскільки зі зменшенням магнітного потоку, за правилом Ленца, ЕРС самоіндукції матиме такий самий знак, як і ЕРС джерела струму.

Графік зміни сили струму в колі в момент розмикання наведено на мал. 1.28.



Струм поступово зменшується від значення I_0 , яке було перед розмиканням, до нуля, нагріваючи при цьому провідники. Якби обмотка котушки була виготовлена з надпровідного матеріалу і замкнута таким самим провідником, то струм у колі існував би нескінченно довго.

Повторимо попередній дослід за умови, що котушка має малий опір, а лампочка — великий. Джерело струму підберемо так, що в разі замикання кола струм у ньому проходитиме, але лампочка не світитиметься. Якщо ж розімкнути коло, то лампочка яскраво спалахне і поступово погасне. Це означає, що в колі з'явилася ЕРС набагато більша, ніж ЕРС джерела струму. Струм у колі вимикається майже миттєво, тому швидкість зміни магнітного потоку матиме велике значення, а ЕРС самоіндукції значно переважає значення ЕРС джерела струму в колі. Залежність ЕРС при розмиканні кола від часу наведено на мал. 1.29.



До моменту t_0 в колі існувала лише ЕРС джерела струму $\mathcal{E}_0$. Після розмикання кола ця ЕРС зникла,

але з'явилася значно більша ЕРС самоіндукції $\mathcal{E}_{si}$.

Появу великої ЕРС можна спостерігати в повсякденному житті. Наприклад, коли штанга тролейбуса з якихось причин від'єднується від контактної мережі і коло живлення електродвигуна, який має значну індуктивність, розривається, з'являється велика іскра. З цієї ж причини вимикачі, які працюють у колах з великими індуктивностями, виготовляють із розрахунком на значно більші напруги, ніж робочі напруги цих кіл.

Поява іскри між контактами вимикача при розмиканні кола обумовлена явищем електромагнітної індукції в даному колі

У потужних роз'єднувачах, які працюють на великих електророзподільних підстанціях, контакти занурюють у масляні ванни, які гасять електричну дугу, що виникає внаслідок самоіндукції при розмиканні кола.

Для вимкнення потужних електродвигунів використовують спеціальні реостати, які поступово зменшують силу струму в колі і тим самим запобігають шкідливим проявам явища самоіндукції, які здатні вивести з ладу ізоляцію обмоток.

Приклад. Визначте індуктивність соленоїда, якщо сила струму в ньому мінюється на 50 А за 1 с і виникає ЕРС самоіндукції 0,08 В.

Дано:

$$\begin{array}{l} \Delta I = 50 \text{ А} \\ \Delta t = 1 \text{ с} \\ \mathcal{E}_{si} = 0,08 \text{ В} \\ L = ? \end{array}$$

Розв'язування

Відповідно до закону ЕРС самоіндукції дорівнює $|\mathcal{E}_{si}| = \frac{L\Delta I}{\Delta t}$. Звідси

$$L = \frac{\mathcal{E}_{si}\Delta t}{\Delta I}$$

Підставивши відповідні числові значення, одержимо

$$L = \frac{0,08 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{50 \text{ А}} = 1,6 \text{ мГн}$$

Відповідь: Індуктивність соленоїда 1,6 мГн.

ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОВІДНИКА ЗІ СТРУМОМ

Явище самоіндукції підтверджує дію закону збереження і перетворення енергії в електромагнітних явищах. Унаслідок явища самоіндукції при замиканні електричного кола з'являється ЕРС

самоіндукції $\mathcal{E}_{si}$, яка за правилом Ленца мала б компенсувати ЕРС джерела струму і, тим самим, унеможливити встановлення струму певного значення в електричному колі. Насправді такого не спостерігається. Хоча й протягом певного часу, але в колі врешті-решт встановлюється струм, значення якого визначається лише законом Ома для повного кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

де I — сила струму; $\mathcal{E}$ — ЕРС джерела струму; $(R + r)$ — повний опір електричного кола.

За умови, що сила струму в колі не змінюється, ЕРС самоіндукції дорівнює нулю. Такий стан в електричному колі встановлюється тому, що за рахунок енергії джерела струму виконується робота з коменсації ЕРС самоіндукції. Це аналогічно випадку, коли для надання нерухомому тілу масою певної швидкості v потрібно виконати певну роботу з подолання інерції:

$$A = \frac{mv^2}{2}.$$

Явище самоіндукції підпорядко ване закону збереження енергії

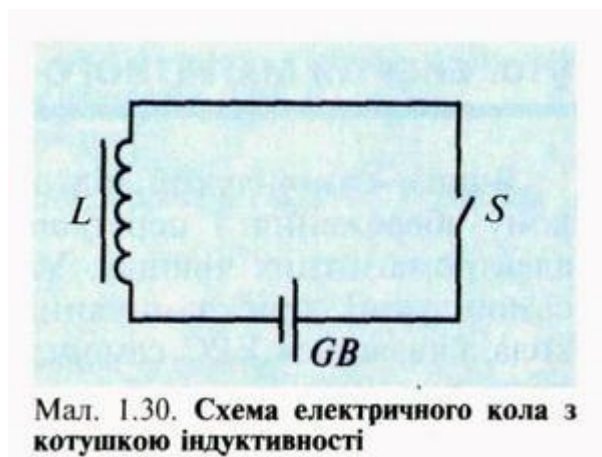
ЕРС самоіндукції компенсується за рахунок ЕРС джерела струму

ЕРС самоіндукції залежить від індуктивності провідника і швидкості зміни сили струму в ньому

Робота джерела струму, за законом збереження і перетворення енергії, виконується не безслідно. У котушці зі струмом чи навколо будь-якого провідника виявимо магнітне поле. Будь-які зміни сили струму в котушці викличуть появу ЕРС індукції і приведуть до виконання роботи джерелом струму. Ця робота змінить енергію магнітного поля котушки чи провідника довільної форми.

Отже, магнітне поле провідника зі струмом має енергію, яка дорівнює роботі джерела струму впродовж встановлення стабільного значення сили струму в колі.

Нехай котушка індуктивності L увімкнена в електричне коло із джерела струму GB і вимикача S (мал.1.30).



Довжина з'єднувальних провідників невелика, тому їх індуктивністю можна знехтувати.

У момент замикання електричного кола з'являється ЕРС самоіндукції, яка дорівнює

$$|\mathcal{E}_{si}| = \frac{L\Delta I}{\Delta t}.$$

Для компенсації цієї ЕРС джерело струму виконує роботу з переміщення заряджених частинок, загальний заряд яких дорівнює q . За визначенням, ця робота дорівнює

$$A = q\mathcal{E}_{si},$$

або

$$A = \frac{qL\Delta I}{\Delta t}.$$

При цьому сила струму в колі змінюється від нуля до $I_{\max}$.

За означенням

$$q = I\Delta t.$$

Однак при замиканні кола струм не має сталого значення. Для спрощення вважатимемо, що сила струму для розрахунку значення заряду лінійно змінюється з плином часу. Тоді візьмемо значення сили струму

$$I = \frac{I_{\max}}{2}.$$

Отже,

$$A = \frac{LI_{\max}\Delta t}{2} \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Зміна сили струму ΔI за інтервал часу Δt дорівнюватиме $I_{\max}$:

$$\Delta I = I_{\max}.$$

Робота, виконана джерелом струму, дорівнюватиме енергії магнітного поля котушки зі струмом. Отже,

$$W_{\text{м}} = \frac{LI_{\max}\Delta t}{2} \frac{I_{\max}}{\Delta t} = \frac{LI_{\max}^2}{2}.$$

Врахувавши, що $I_{\max} = I_0$, одержимо

$$W_M = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Робота в електричному колі при електромагнітній індукції

$$A = \frac{qL\Delta I}{\Delta t}.$$

Енергія магнітного поля залежить від індуктивності провідника і сили струму в ньому

$$W_M = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Енергія магнітного поля котушки зі струмом пропорційна індуктивності котушки і квадрату сили струму в ній.

Висновок справедливий для будь-якого провідника зі струмом, крім біфілярного.

За рахунок енергії магнітного поля виникає ЕРС самоіндукції при розмиканні кола (див. §9). Струм у колі котушки і лампочки, ввімкненої паралельно котушці, деякий час проходить, хоча джерело струму від'єднане.

Маса — в механіці, індуктивність — в електродинаміці

Порівняння формул для енергії магнітного поля і енергії рухомого тіла дає змогу дійти висновку, що індуктивність в електричному колі є аналогом маси у механічних взаємодіях, виступає «інерційним» елементом у колі і визначає швидкість зміни сили струму.

ЗАПИТАННЯ

1. Як проявляється явище самоіндукції при замиканні електричного кола?
2. У чому проявляється явище самоіндукції при розмиканні електричного кола?
3. Як впливає індуктивність кола на перебіг самоіндукції?
4. Як пояснюють явище самоіндукції?
5. Яка роль джерела струму в колі у момент прояву явища самоіндукції?
6. Від чого залежить ЕРС самоіндукції?
7. Дайте означення одиниці індуктивності в СІ.
8. Від яких величин залежить енергія магнітного поля провідника зі струмом?

9. Які перетворення енергії відбуваються під час замикання електричного кола з індуктивністю?
10. Які перетворення енергії відбуваються під час розмикання електричного кола з індуктивністю?
11. Яка механічна величина аналогічна, індуктивності провідника?
12. Чим пояснюють появу дільника «2» у формулі енергії магнітного поля електричного струму?

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Тема 1.1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Поняття про електричне поле. Енергія електричного поля. Електричне поле в діелектрику і напівпровіднику. Конденсатор, його заряд і електрична ємність. Електричний пробій. Електроізоляційні матеріали.

Задачі і питання для самоперевірки

1. Зобразіть картину електричного поля позитивно точкового заряду. В якому напрямі стане рухатися пробний негативний заряд, який розташований в цьому полі ?
2. Яке поле називається електростатичним?
3. Що таке напруженість електричного поля? Чи має ця величина напрямок?
4. В яких одиницях вимірюють напруженість електричного поля?
5. Що називається напругою між двома точками поля? Наведіть зв'язок між напруженість і напругою?
6. Напруженість електричного поля у поверхні Землі $E = 130 \text{ В/м}$. Чому дорівнює напруга між головою людини, який має зріст 1,7 м, і його ногами? *Відповідь:* 221 В.
7. Дайте визначення потенціалу. Вирахуйте потенціали анода і сітки електронної лампи відносно катода, якщо дано, що для переносу електрона з зарядом $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ із катода на анод потрібно виконати роботу $4 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$, а з катода на сітку $1,6 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$. *Відповідь:* 250 В, 10 В.
8. Чи можна вважати водний розчин лугу провідником другого роду? Для яких провідників характерна електрона електропровідність?
9. Яким зарядом володіє конденсатор ємністю 2 мкФ, якщо напруга між його пластинами дорівнює 100 В? *Відповідь:* $2 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$.
10. Напишіть формулу для ємності плоского конденсатора. Як зміниться його ємність, якщо одночасно зменшити площу пластин в 2 рази, а відстань між ними в 3 рази? *Відповідь:* збільшиться в 1,5 разів.
11. Визначте ємність плоского конденсатора, якщо площа його пластин дорівнює $0,001 \text{ м}^2$, а відстань між пластинами 0,1 мм, а відносна діелектрична проникливість дорівнює 7,0. *Відповідь:* $0,62 \times 10^{-9} \text{ Ф}$.
12. Скільки пластин площею $0,01 \text{ м}^2$ потрібно скласти, щоб одержати конденсатор ємністю 1 мкФ, якщо в якості діелектрика використана локотканина товщиною 0,05 мм з відносною діелектричною проникливістю, яка дорівнює 50 ? *Відповідь:* 11.
13. Визначте енергію, накопичену в конденсаторі ємністю 10 мкФ при напрузі на пластинках 100 В. *Відповідь:* 0,05 Дж.
14. Три конденсатори ємністю 3, 6 і 2 мкФ з'єднали спочатку паралельно, а потім послідовно. У скільки разів змінилася їх загальна ємність? *Відповідь:* в 11 раз.
15. Поясніть явище поляризації діелектрика. Чому поляризовані атоми послаблюють зовнішнє поле?

16. Перерахуйте основні типи діелектриків: газоподібних, рідних і твердих. Які з них використовуються в електричних апаратах і електричних машинах?
17. При випробуванні в стандартному розряднику трансформаторної олії пробій настав при напрузі 25 кВ. Застосовуючи пробивну напругу для олії 1000 кВ/м, визначте відстань між електродами розрядника. *Відповідь: 2,5 см.*

Тема 1.2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Електричний струм в металах, його напрям. Джерела живлення. Електричне коло, його основні елементи і умовні позначення, які використовуються на схемах. Сила і густина струму, одиниці виміру. Електрорушійна сила джерела і напруга на його елементах. Енергія і потужність електричного кола, баланс потужностей. Закон Ома для ділянки кола. Електричний опір і провідність. Питомий опір і питома провідність. Резистор. Залежність опору від температури. Закон Ома для всього кола. Режими роботи кола: холостий хід, коротке замикання, зміне навантаження.

Перетворення електричної енергії в теплову. Закон Джоуля-Ленца. Нагрівання проводів. Питома допустимий (номінальний) струм в проводі. Плавкі запобіжники. Вибір перерізу проводу в залежності від допустимого струму. Основні провідникові матеріали.

Послідовне, паралельне і змішане з'єднання резисторів. Втрати напруги в проводах ліній електропередач і допустиме його значення. Перший закон Кірхгофа. Другий закон Кірхгофа, його використання. Поняття про розрахунок складних кіл. Робота джерела в режимі генератора і споживача.

Задачі і питання для самоперевірки

1. Що називається електричним струмом? Вкажіть його напрям у зовнішньому і внутрішньому колах джерела електричної енергії?
2. Приведіть приклади джерел електричного струму в яких механічна і хімічна енергія перетворюються в електричну.
3. Накресліть схему електричного кола, яке складається з джерела струму, вимикача, запобіжників, та трьох резисторів: R_1 з'єднано з R_2 і R_3 послідовно, R_2 з R_3 з'єднано паралельно. Покажіть на схемі вітки, вузли, контури та вкажіть їх кількість.
4. Дайте визначення електрорушійної сили джерела, напруги на затискачах і внутрішнього падіння напруги.
5. Дано два джерела струму з опорами 0,1 і 0,5 Ом. Яке із них потрібно вибрати, щоб зміна струму навантаження в меншій мірі впливало на значення напруги на його затискачах?
6. Напишіть закон Ома для всього кола і для одної її ділянки: зовнішньої і внутрішньої?
7. Чи можна вважати, що напруга на кінцях якого-небудь резистора одночасно являється падінням напруги в ньому?
8. Напишіть формули для визначення опору провідника через його питомий опір і електричну провідність. Як зміниться опір провідника при одночасному

- збільшені його довжини в чотири рази, а діаметр в два рази? *Відповідь:* залишиться попереднім.
9. Для визначення довжини мідного проводу котушки, до якої прикладена напруга 4 В і визначили струм в колі, який виявився рівним 0,5 А, діаметр проводу 0,8 мм. Знайдіть довжину проводу, якщо провідність міді 53 м/(Ом · мм²). *Відповідь:* 213.
 10. Напишіть формули для визначення потужності, яка втрачається в резисторі опором R , через квадрат струму і опору; квадрат напруги і опору; струм і напругу.
 11. Електрична піч розрахована на напругу 220 В і струм 5 А. Яку енергію витрачає піч за 4 г. роботи? Приймаючи вартість 1 кВт · г, яка рівна 15 коп., визначте вартість витраченої енергії. *Відповідь:* 4,4 кВт · г; 0,66 грн.
 12. Яке явище називається коротким замиканням кола? Як захистити коло від струму короткого замикання?
 13. Напишіть формулу для визначення втрати напруги в провідниках. Чому дорівнює К.к.д. лінії електропередачі напругою 220 В, якщо в ній втрачається 10 В? *Відповідь:* 94,5 %.
 14. Виведіть формули для визначення загального опору кола у двох випадках: а) послідовно ввімкнені резистори R_1, R_2, R_3, R_4 ; б) паралельно ввімкнені резистори R_1, R_2, R_3 .
 15. Послідовно ввімкнені три резистора : $R_1=10$ Ом; $R_2 = 15$ Ом; $R_3 = 6$ Ом. Чому дорівнює загальний опір кола? Яке падіння напруги буде на третьому резисторі, якщо в коло прикладена напруга, яка дорівнює 62 В? *Відповідь:* 31 Ом, 12 В.
 16. Резистори, які вказані в попередньому запитанні, з'єднали паралельно і включили в коло з напругою 60 В. Чому дорівнює загальний опір кола і струм в другому резисторі? *Відповідь:* 3 Ом, 4 А.
 17. Дві лампи напругою 200 і 25 Вт, розраховані на напругу 127 В, з'єднали послідовно і включили в мережу з напругою 220 В. Яке розжарення буде в кожній лампі?
Відповідь: напруга на лампах $U_1 = 24$ В, $U_2 = 196$ В. Світіння лампи потужністю 200 Вт практично відсутнє.
 18. Напишіть формули для е.р.с. джерела, яке працює в режимі споживача і в режимі генератора. Які напрямки в цих випадках має е.р.с. і струм в лінії?
 19. Сформулюйте другий закон Кірхгофа для замкнутого контура із декількома е.р.с. Як в цьому випадку визначається знак кожної е.р.с.?
 20. Яке коло називається складним? Які закони використовують для його розрахунку?
 21. Складне коло має чотири вузли і п'ять віток. Скільки рівнянь для його розрахунку треба написати за допомогою першого і другого законів Кірхгофа? *Відповідь:* 3 за першим і 2 за другим законом Кірхгофа.
 22. Визначте напругу на навантаженні при живленні її чотирма послідовно з'єднаними джерелами із е.р.с., яка дорівнює 6 В, і внутрішнім опором 20 Ом кожний, якщо струм в колі дорівнює 0,1 А. *Відповідь:* 16 В.
 23. Напишіть формули для визначення е.р.с. батареї і її внутрішнього опору при послідовному і паралельному з'єднанні джерел.

Магнітне поле і його характеристики. Закон повного струму. Взаємодія магнітного поля і провідника з струмом. Електромагнітна сила.

Феромагнітні речовини і їх намагнічування. Криві намагнічування. Явища гістерезису. Втрати енергії при гістерезисі. Магнітом'ягкі і магнітотверді матеріали. Матеріали з прямолінійною петлею гістерезиса і їх використання у вимірвальній і рахунковій техніці.

Магнітне коло. Електромагніти і їх практичне використання. Спрощений розрахунок електромагніта. Електромагнітна індукція. Е.р.с., яка індукована в контурі при вимірюванні магнітного потоку, зчепленого з контуром (формулювання Максвелла). Правило правої руки. Закон Ленца. Перетворення механічної енергії в електричну. Перетворення електричної енергії в механічну. Самоіндукція. Е.р.с. самоіндукції. Індуктивність. Енергія магнітного поля. Взаємна індукція. Взаємна індуктивність. Вихрові струми і їх практичне значення.

Задачі і питання для самоперевірки

1. Що називається магнітним полем? Накресліть магнітне поле навколо прямолінійного провідника з струмом, кільцевого струму і котушки з струмом?
2. Приведіть визначення основних магнітних величин і їх одиниць вимірювання і індукції, магнітного потоку, напруженості, абсолютної магнітної проникливості, намагнічуючої сили.
3. Визначте магнітний потік в магнітопроводі, поперечний переріз якого дорівнює $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, а магнітна індукція 0,8 Тл. *Відповідь:* $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$.
4. При внесенні в магнітне поле сталюого бруска магнітна індукція в ньому виявилась в 500 раз більша магнітної індукції, що створюється тим же полем в повітрі. Чому дорівнює абсолютна магнітна проникливість сталюого бруска? *Відповідь:* $6,28 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/м}$.
5. Виведіть формулу для визначення напруженості магнітного поля на осевій лінії кільцевої котушки.
6. Напишіть формулу, яка зв'язує магнітну індукцію, напруженості і абсолютну магнітну проникливість.
7. На відстані 20 м від провідника із струмом магнітна індукція в повітрі дорівнює $2 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$. Чому дорівнює струм в провіднику? *Відповідь:* 20 А. Див. Формулу (3.9) на ст. 78 підручника Попова.
8. Визначте індукцію магнітного поля, якщо на поміщений в поле провідник довжиною 1 м з опором 10 Ом, який приєднаний до джерела з напругою на затискачах 50 В, діє сила 0,5 Н. *Відповідь:* 0,1 Тл.
9. Від яких величин залежить електромагнітна сила, яка діє на провідник з струмом в магнітному полі? Як визначити напрямок цієї сили? В яких одиницях вимірюють всі величини, які входять в формулу для електромагнітної сили?
10. Як формулюють і записують математично закон повного струму?
11. Визначити напруженість магнітного поля, що створюється котушкою, що має 100 витків, якщо через неї проходить струм 15 А, а довжина середньої силової лінії магнітного поля 2 м. *Відповідь:* 750 А/м.
12. Яке розривне зусилля діє на кожний метр алюмінієвої оболонки двохжильного кабелю, якщо по його жилах, які знаходяться на відстані 10 мм одна від одної проходить струм, дорівнює 200 А? Магнітна проникливість ізоляції жил рівна 1,0. *Відповідь:* 0,8 Н/м.

13. В чому суть намагнічування феромагнітних матеріалів ? Накресліть початкову криву намагнічування сталі. Чому її останню ділянку називають *ділянкою магнітного насичення* ?
14. Який характер має петля гістерезис для магнітом'яких і магнітотвердих матеріалів? Як залежать втрати на гістерезис від площі петлі?
15. Опишіть порядок розрахунку магнітного кола, якщо дано його розміри і магнітний потік або індукція.
16. На сталюму магнітопроводі розміщена котушка з числом витків, яка дорівнює 800. Визначте напругу магнітного поля, якщо струм в котушці дорівнює 2 А, а довжина середньої магнітної лінії складає 0,2 м. *Відповідь: 8000 А/м.*
17. Сформулюйте принцип електромагнітної індукції. Чому при русі провідника в магнітному полі відбувається розподіл зарядів в провіднику ?
18. Як визначити значення і напрям е.р.с., наведеної в провіднику, що рухається в магнітному полі?
19. Літак з розмахом крил 20 м летить горизонтально із швидкістю 1800 км/год. Визначте індукцію магнітного поля Землі (її вертикальну складову), якщо різниця потенціалів між кінцями крил дорівнює 0,5 В. *Відповідь: $5 \cdot 10^{-5}$ Тл.*
20. Сформулюйте закон Ленца.
21. Виведіть формулу для визначення е.р.с. в контурі при його переміщенні в магнітному полі. Про що говорить знак мінус в цій формулі ?
22. Визначте е.р.с. в котушці із числом витків 250, якщо магнітний потік, що пронизує її, зростає із швидкістю 0,01 Вб/с. *Відповідь : -2,5 В.*
23. Поясніть суть явища самоіндукції. Від яких факторів залежить е.р.с. самоіндукції ? Який напрямок має вона при збільшенні і зменшенні струму в колі ?
24. Визначте е.р.с. самоіндукції в котушці з індуктивністю 0,1 Гн, якщо струм в котушці рівномірно зростає із швидкістю 20 А/с. *Відповідь : -2 В.*
25. Поясніть принцип виникнення вихрових струмів в сталюх магнітопроводах електричних машин і трансформаторів. Як впливають ці струми на роботу машин ?

Тема 1.4. ОДНОФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Змінний струм, його визначення. Період і частота змінного струму.

Фаза, початкова фаза, зсув фаз. Діюче значення струму, напруга та е.р.с. Одержання синусоїдальної е.р.с. Кутова швидкість і кутова частота. Зображення синусоїдальних величин кривими – синусоїдами та обертаючими векторами. Векторна діаграма.

Особливості кіл змінного струму. Коло змінного струму з активним опором . Векторна діаграма, криві струму, напруги та потужності. Середня (активна) потужність. Коло змінного струму з індуктивністю. Векторна діаграма; криві струму, напруги та потужності. Реактивний індуктивний опір. Середня і максимальна (реактивна) потужності. Коло змінного струму з ємністю.

Загальний випадок послідовного з'єднання активного, індуктивного і ємнісного опорів. Векторна діаграма. Розкладка напруг на активні і реактивні складові. Резонанс напруг, умови резонансу напруг.

Загальний випадок паралельного з'єднання активно-індуктивних і ємнісних опорів. Векторна діаграма. Розкладання струмів на активні і реактивні складові. Резонанс струмів, умови резонансу струмів. Техніко-економічні значення реактивної потужності в електричних системах. Використання конденсатора для компенсації реактивної потужності.

Задачі і питання для самоперевірки

1. Яким чином можна отримати е.р.с. синусоїдальної форми і від яких факторів залежить її значення?
2. Що називають *миттєвим, амплітудним і діючим значеннями струму і напруги*? До яких із цих значень відносяться стандартні напруги 127, 220, 380, 660 В?
3. Виведіть залежність частоти змінного струму від частоти обертання рамки і числа пар полюсів машин.
4. Визначте період і частоту змінного струму, якщо кутова частота дорівнює 314 рад/с.
Відповідь: 0,02 с, 50 Гц.
5. Вираз для миттєвих значень струму і напруг має вигляд: $i = 14,2 \sin (wt + \Pi / 2)$; $U = 169 \sin (wt + \Pi / 2)$. Визначте покази амперметра і вольтметра, які ввімкнені в це коло. Відповідь: 10 А, 120 В.
6. Що називається *початковим фазовим кутом і кутом зсуву фаз*? Як визначити кут зсуву фаз між двома е.р.с., використовуючи їх хвильові діаграми?
7. Як визначити, яка із синусоїдальних величин випереджає по фазі іншу?
8. Накресліть графіки струму, напруги, потужності і векторну діаграму для кола з активним опором. Який вигляд має закон Ома для цього кола?
9. Це саме, для кола із індуктивністю; це саме, для кола із ємністю.
10. Це саме, для нерозгалуженого кола із активним опором, індуктивністю і ємністю. Накресліть для такого кола трикутники напруги, опорів і потужностей.
11. В чому заключається явище резонансу напруг? Які його наслідки? Чому при резонансі напруга на котушці і конденсаторі може перевищувати напругу мережі?
12. В колі змінного струму ввімкнений резистор із опором $R = 10 \text{ Ом}$. Струм і напруга в колі змінюється за законами $i = 28,2 \sin 314wt$, $u = 311 \sin 314wt$. Визначте покази амперметра, вольтметра і ватметра, які ввімкнені в це коло. Відповідь: 20 А, 220 В, 4400 Вт.
13. В коло попережного прикладу включили котушку із індуктивністю $L = 0,01 \text{ Гн}$. Визначте її індуктивний опір. Відповідь: 3,14 Ом.
14. Визначте опір конденсатора ємністю 5 мкФ при частоті змінного струму 50 Гц. При якій частоті його опір зменшиться в 10 раз? Відповідь: 637 Ом, 500 Гц.
15. Конденсатор і електричну лампу з'єднали послідовно і включили в мережу змінного струму із напругою 220 В і частотою 50 Гц. Яку ємність повинен мати конденсатор, щоби лампа потужністю 60 Вт і напругою 127 В мала нормальне розжарення?
Відповідь: 8,3 мкФ.
16. Накресліть векторну діаграму кола при паралельному з'єднанні реальної котушки і конденсатора без втрат.
17. Як визначити струм в нерозгалуженій частині кола при паралельному з'єднанні опорів?
18. Напишіть умови, коли наступить в колі резонанс струмів і накресліть для такого випадку векторну діаграму. В колі реактивна котушка і конденсатор без втрат.
19. Чому підвищення реактивної потужності споживача приводить до необхідності збільшення встановленої потужності генераторів і трансформаторів?
20. Що називається *коефіцієнтом реактивної потужності*?
21. Яку реактивну потужність називають *оптимальною*?

22. Підприємство споживає активну потужність $P=1000$ кВт і реактивну $Q=800$ квар. Енергосистема задає підприємству оптимальну реактивну потужність $Q_e=300$ квар. Визначте необхідну потужність конденсаторної батареї для виконання припису енергосистеми. Чому дорівнює коефіцієнт реактивної потужності до встановлення батареї конденсаторів і після його встановлення. *Відповідь* : $Q_6=500$ квар; $\operatorname{tg} \varphi=0,8$;
 $\operatorname{tg} \varphi_3=0,3$.

Варіант	R, Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	Завдання	Визначити	Відповіді
1	3	6	2	$I = 10$ А	z ; U ; $\cos \varphi$; S ; P ; Q	$z = 5$ Ом; $U = 50$ В; $\cos \varphi = 0,6$; $S = 500$ В.А; $P = 300$ Вт; $Q = 400$ вар
2	8	4	10	$S = 640$ В.А	Z ; I ; U ; $\operatorname{tg} \varphi$; P ; Q	$z = 10$ Ом; $I = 8$ А; $U = 80$ В; $\operatorname{tg} \varphi = - 0,6$; $P = 512$ Вт; $Q = - 384$ вар
3	12	20	4	$P = 192$ Вт	Z ; I ; U ; $\sin \varphi$; Q ; S	$z = 20$ Ом; $I = 4$ А; $U = 80$ В; $\sin \varphi = 0,8$; $Q = 256$ вар; $S = 320$ В.А
4	6	4	12	$U = 50$ В	z ; I ; $\cos \varphi$; S ; Q ; P	$z = 10$ Ом; $I = 5$ А ; $\cos \varphi = 0,6$; $S = 250$ В.А ; $P = 150$ Вт; $Q = - 200$ вар

23. Для нерозгалуженого кола змінного струму, який має активний, індуктивний і ємнісний опір, визначте величини, які показані в таблиці варіантів.
24. Для розгалуженого кола змінного струму, який має дві паралельні вітки, визначити величини, показані в таблиці варіантів.

Варіант	Перша гілка			Друга гілка			Задано	Визначити	Відповіді
	R_1 , Ом	X_{L1} , Ом	X_{C1} , Ом	R_2 , Ом	X_{L2} , Ом	X_{C2} , Ом			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

1	6	8	-	-	-	10	$U=100\text{В}$	$I_1; I_2; P;$ $Q; S; I$	$I_1 = I_2 = 10$ $\text{А};$ $P = 600 \text{ Вт};$ $Q = - 200$ $\text{вар};$ $S = 633$ $\text{В.А};$ $I = 6,33 \text{ А}$
2	6	-	-	-	-	8	$I_1 = 8 \text{ А}$	$U; I_2; I; P;$ $Q; S$	$U = 48 \text{ В};$ $I_2 = 6 \text{ А};$ $I = 10 \text{ А};$ $P = 384 \text{ Вт};$ $Q = - 288$ $\text{вар};$ $S = 480 \text{ В.А}$
3	-	5	-	3	-	4	$P = 192$ Вт	$I_1; U; I_2;$ $Q; S; I$	$I_1 = 8 \text{ А};$ $U = 40 \text{ В};$ $I_2 = 8 \text{ А};$ $Q = 64 \text{ вар};$ $S = 202$ $\text{В.А};$ $I = 5,05 \text{ А}$

Тема 1.5. ТРИФАЗНІ КОЛА

Порівняння однофазної і трифазної систем змінних струмів. Генерування трифазної е.р.с. Чотирьохпровідна трифазна система при з'єднанні котушок генератора та споживачів у зірку. Фазові і лінійні напруги генератора і споживача. Співвідношення між фазовими і лінійними напругами. Рівномірне і нерівномірне навантаження. Фазові і лінійні струми. Векторна діаграма напруг та струмів. Нейтральний (нульовий) провід та його значення.

З'єднання котушок генератора в трикутник; недоліки цього з'єднання. З'єднання споживачів втрикутник. Залежність між фазовими і лінійними струмами. Векторна діаграма напруг та струмів. Потужність трифазного кола при з'єднанні споживачів в зірку і трикутник.

Задачі і питання для самоперевірки

1. Які переваги має трифазна система перед однофазною?

2. Як одержати трифазну систему е.р.с.? Як стандартні напруги використовуються для трифазних кіл?
3. Накреслити схеми незв'язаної та зв'язаної систем; для зв'язаної системи – при з'єднанні котушок генератора і споживача зіркою та трикутником. Покажіть на схемі фазні та лінійні напруги.
4. Наведіть співвідношення між фазними та лінійними напругами і струмами при з'єднанні зіркою та трикутником.
5. Кожна фаза котушки трифазного електродвигуна розрахована на напругу 380 В. Як треба з'єднати котушки при лінійній напрузі мережі 380 і 660 В ?
6. Три однакових резистори з'єднали зіркою і включили в мережу із лінійною напругою $U_{ном.}$. Потім резистори з'єднали трикутником і включили в цю ж мережу. У скільки разів змінились лінійні струми при такому переключенні резисторів ?

Відповідь : в 3 рази.

7. В яких випадках використовують чотирьохпровідну систему ? Яка в ній роль нульового проводу ?
8. До трифазної мережі із нульовим проводом приєднане несиметричне навантаження: в фазу А ввімкнені активний опір $R_A=6$ Ом і індуктивний $X_{LA}=8$ Ом, а в фазу В – ємнісний опір $X_{CB}=5$ Ом, в фазу С – активний опір $R_C=10$ Ом. Навантаження з'єднане "зіркою". Лінійна напруга мережі $U_{ном.}=380$ В.
9. Визначити лінійні струми, накреслити векторну діаграму, із якої графічно знайдіть струм в нульовому проводі. *Відповідь : $I_A=38$ А; $I_B=44$ А; $I_C=38$ А; $I_0=47$ А.*
10. Накреслити в масштабі векторну діаграму напруг і струмів споживача при симетричному навантаженні і з'єднанні "трикутником". Із діаграми графічно визначте лінійні струми. Споживач в кожній фазі містить активний опір $R=4$ Ом і індуктивний $X_L=3$ Ом. Лінійна напруга мережі $U_{ном.}=220$ В. *Відповідь : $I_L=76$ А.*
11. Чому в нульовому проводі не дозволяється встановлювати запобіжник? Чи є аварійним режимом обрив нульового проводу при з'єднанні трифазного генератора і споживача: а) при симетричному навантаженні ; б) при несиметричному навантаженні?
12. Як визначити активну, реактивну і повну потужності в трифазному колі при симетричному і несиметричному навантаженні?
13. Визначте активну потужність трифазного споживача, з'єданого "зіркою", який має в кожній фазі активний та індуктивний опір. Повний опір фази дорівнює 9 Ом, коефіцієнт потужності фази $\cos \varphi=0,7$. Лінійна напруга мережі $U_{ном.}=380$ В.

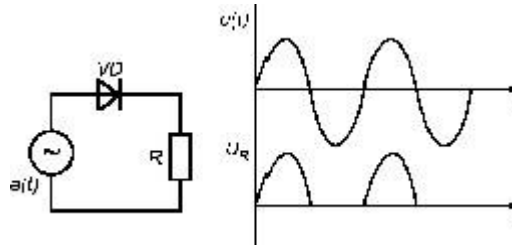
Відповідь: 11,25 кВт.

Електричні кола **періодичного несинусоїдного струму**

В залежності від режиму роботи та характеру кола ЕРС генераторів, напруги та струми у колах можуть у більшій або меншій мірі відрізнятися від синусоїдних.

Напруги та струми у колі будуть несинусоїдними, якщо джерела синусоїдних ЕРС, які підключені до кола мають різні частоти. Навіть коли ЕРС має синусоїдну форму при наявності у колі нелінійного **елементу** форма кривої струму може різко відрізнятися від синусоїди.

Приклад: однопівперіодний випрямляч



Таким чином, у багатьох електротехнічних та електричних пристроях несинусоїдні напруги та струми є звичайним явищем, тобто нормальним робочим режимом.

Окрім розрахунку струмів та напруг у електричному колі при несинусоїдних струмах часто необхідно знати гармонічний склад або ступінь відхилення від синусоїди того або іншого сигналу.

Нехай задана періодична несинусоїдна функція часу з періодом T :

$F(t) = f(t+T)$. Будемо вважати, що функція $f(t)$ частково-неперервна на періоді (може мати розриви першого роду, тобто скінчена справа та зліва від точки розриву) та має скінчену кількість мінімумів та максимумів. Таким чином, вона задовольняє умовам Дирихле. Струми та напруги у реальних електричних колах задовольняють цим умовам.

Періодична несинусоїдна функція, що задовольняє умовам Дирихле, може бути зображена у вигляді нескінченного гармонічного ряду – ряду Фур'є. Сума цього ряду співпадає зі значеннями функції $f(t)$ для всіх точок неперервності цієї функції, а у точках розриву – дає середнє арифметичне лівого та правого граничних значень $f(t)$, тобто:

$$\frac{1}{2} [f(t_-) + f(t_+)]$$

Ряд Фур'є у тригонометричній формі

Ряд Фур'є у тригонометричній формі має такий вигляд:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t),$$
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos n\omega t dt,$$
$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin n\omega t dt,$$

$a_0/2$ – постійна складова (визначається для $n = 0$), яка є середнім значенням функції $f(t)$ за **період**;

a_n, b_n – амплітуди косинусоїдних та синусоїдних членів ряду Фур'є.

Синусоїдна та косинусоїдна складові з кутовою частотою ω утворюють першу (основну) гармоніку.

Коефіцієнти ряду не залежать від моменту часу t_0 , який може бути обраний довільно.

Будемо вважати що $t_0 = 0$ та введемо нову змінну $\nu = \omega t$. Тоді можна записати:

$$f(\vartheta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\vartheta + b_n \sin n\vartheta),$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta \, d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta \, d\vartheta,$$

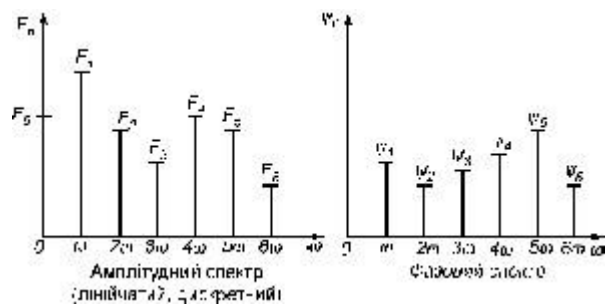
$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) \sin n\vartheta \, d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\vartheta) \sin n\vartheta \, d\vartheta.$$

Якщо прийняти $a_n = F_n \sin \psi_n$; $b_n = F_n \cos \psi_n$, то $f(\vartheta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin(n\vartheta + \psi_n)$.

$F_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$; $\psi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}$ визначається з урахуванням знаків коефіцієнтів. Якщо $b_n < 0$ треба додати π !

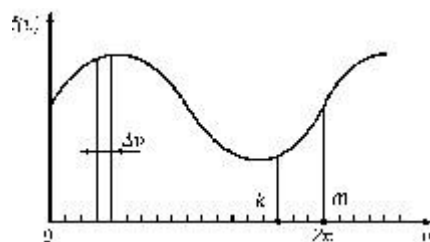
Така форма зображення зручна, якщо необхідно визначити процентний зміст кожної гармоніки.

Сукупність гармонічних складових, які входять до ряду Фур'є, називається частотним спектром сигналу.



Графоаналітичний метод розкладання в ряд Фур'є

Це наближений метод чисельного інтегрування. Його використовують, коли необхідно визначити гармонічний склад несинусоїдної функції складної форми (або функції, що задана таблицею). При цьому обчислення визначеного інтеграла замінюється обчисленням суми скінченного числа складових. **Період** функції $f(\nu)$, що дорівнює 2π , розбивається на m однакових інтервалів $\Delta \nu$ так, щоби $m \Delta \nu = 2\pi$. Звичайно $m = 12, 18, 24, 36, 48 \dots$



Відстань від початку координат до середини k -го інтервалу буде визначатися співвідношенням:

$$\vartheta_k = \left(K - \frac{1}{2} \right) \frac{2\pi}{m}.$$

Нехай значення періодичної несинусоїдної функції на середині k -го інтервалу буде $f(\vartheta_k)$. Коефіцієнти ряду Фур'є визначаються таким чином:

$$a_n \cong \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^m f(\vartheta_k) \cos(n\vartheta_k) \cdot \Delta\vartheta = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m f(\vartheta_k) \cos \left[n \left(k - \frac{1}{2} \right) \frac{2\pi}{m} \right];$$

$$b_n \cong \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^m f(\vartheta_k) \sin(n\vartheta_k) \cdot \Delta\vartheta = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m f(\vartheta_k) \sin \left[n \left(k - \frac{1}{2} \right) \frac{2\pi}{m} \right].$$

Якщо у межах періоду є точки розриву, то при обраному способі завдання ϑ_k , доцільно розбивати період на такі інтервали, щоб точки розриву не потрапляли на їх середину.

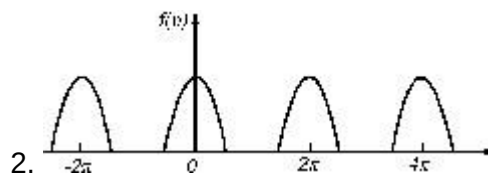
Якщо брати значення функції $f(\vartheta)$ на початку або на кінці інтервалів, то для випадку парної функції у розкладанні будуть як косинусоїди, так і синусоїди, яких парна функція не містить.

Вплив симетрії форми періодичної кривої на її гармонічний склад

У більшості випадків несинусоїдні ЕРС, напруги та струми мають який-небудь вид симетрії, а це значно полегшує їх розкладання у ряд Фур'є.

Розглядають такі види симетрії:

1. Функція $f(\vartheta)$ симетрична відносно вісі ординат (парна функція), тобто $f(-\vartheta) = f(\vartheta)$.



Так як синусоїдні складові любых частот є непарні функції, то вони не входять до складу ряду, а тому:

$$f(\vartheta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\vartheta.$$

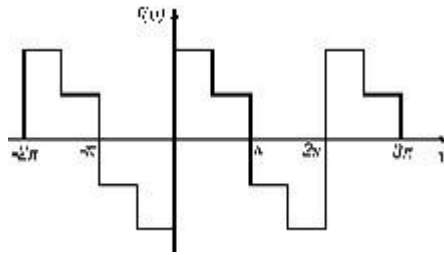
Тобто парна функція містить тільки косинусоїдні та постійну складові. При цьому для визначення коефіцієнтів a_n користуються формулою:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta d\vartheta.$$

Це витікає з того, що:

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta d\vartheta &= \int_{-\pi}^0 f(\vartheta) \cos n\vartheta d\vartheta + \int_0^{\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta d\vartheta = \\ &= \int_{\pi}^0 f(-\vartheta) \cos n(-\vartheta) d(-\vartheta) + \int_0^{\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta d\vartheta = 2 \int_0^{\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta d\vartheta. \end{aligned}$$

2. Функція $f(\vartheta)$ симетрична відносно початку координат (непарна функція), тобто $f(-\vartheta) = -f(\vartheta)$.



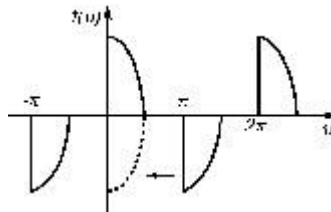
Так як постійна складова та косинусоїди цій умові не задовольняють, то в розкладанні можуть бути лише синусоїдні складові, тобто:

$$f(\vartheta) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\vartheta$$

При цьому:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\vartheta) \sin n\vartheta d\vartheta$$

3. Функція $f(\nu)$ симетрична відносно вісі абсцис при суміщенні двох півперіодів у часі, тобто $f(\nu) = -f(\nu + \pi)$ (антиперіодична функція).



Для такого виду симетрії можна записати:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\vartheta + b_n \sin n\vartheta) = -\frac{a_0}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n(\vartheta + \pi) + b_n \sin n(\vartheta + \pi)]$$

Для парних n :

$$a_0 + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} (a_n \cos n\vartheta + b_n \sin n\vartheta) = 0$$

Ця умова для довільних ν виконується лише тоді, коли $a_0 = a_n = b_n = 0$. Таким чином для такого виду симетрії:

$$f(\vartheta) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (a_n \cos n\vartheta + b_n \sin n\vartheta);$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\vartheta) \cos n\vartheta d\vartheta, \quad b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\vartheta) \sin n\vartheta d\vartheta$$

Функція, яка симетрична відносно вісі абсцис при суміщенні двох півперіодів містить лише непарні гармоніки.

Якщо одночасно виконуються умови симетрії за пунктами 1 та 3, то у розкладанні будуть тільки непарні косинусоїди.

Припустимо, що функція яка містить тільки непарні косинусоїди, відповідає умові $f(\nu) = -f(\nu + \pi)$. Так як для непарних n $\cos n(\vartheta + \pi) = -\cos n\vartheta$, то:

$$a_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\vartheta) \cos n\vartheta \, d\vartheta$$

Якщо функція, яка містить лише непарні синусоїди, відповідає умові $f(\nu) = f(\pi - \nu)$, то з урахуванням того, що для непарних n $\sin(n\nu) = \sin(n(\pi - \nu))$, то:

$$a_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\vartheta) \sin n\vartheta \, d\vartheta$$

Види симетрії залежать від вибору початку відліку. Якщо початок відліку може бути обраний довільно, то обирати його доцільно так, щоб найбільше було б збігів різних випадків симетрії.

Перенесення початку відліку

Нехай для деякої періодичної несинусоїдної функції $f(\nu)$ відомі коефіцієнти ряду Фур'є a_n та b_n . Тоді функцію $f(\nu)$ можна зобразити у вигляді:

$$f(\vartheta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\vartheta + b_n \sin n\vartheta)$$

Якщо зсунути початок відліку на деякий відрізок β вправо або вліво відносно вихідного початку координат, то розкладання у ряд Фур'є з урахуванням перенесення початку координат можна отримати заміною ν на $\nu_1 + \beta$, де ν_1 – абсциса у новій системі координат. Додатне β відповідає зсуву нового початку відліку вправо, а від'ємне – вліво.

$$f(\vartheta_1 + \beta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n(\vartheta_1 + \beta) + b_n \sin n(\vartheta_1 + \beta))$$

Наведена формула дозволяє легко знаходити розкладання у ряд Фур'є функції, якщо відомі коефіцієнти ряду Фур'є для іншої функції, яка виходить у результаті зсуву вихідної функції по вісі абсцис.

Комплексна форма ряду Фур'є

За формулами Ейлера:

$$\cos n\vartheta = \frac{e^{jn\vartheta} + e^{-jn\vartheta}}{2}; \quad \sin n\vartheta = \frac{e^{jn\vartheta} - e^{-jn\vartheta}}{2j}$$

Тоді можна записати:

$$a_n \cos n\vartheta + b_n \sin n\vartheta = \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\vartheta} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jn\vartheta}$$

а ряд буде мати вигляд:

$$f(\vartheta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\vartheta} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jn\vartheta} \right)$$

За визначенням a_n -парне, а b_n -непарне відносно n , тобто $a_n = a_{-n}$; $b_n = -b_{-n}$.

З урахуванням того, що:

$$\frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\vartheta} = \frac{a_0}{2} \quad \text{при } n = 0,$$

можна записати:

$$f(\vartheta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\vartheta} + \sum_{n=-1}^{-\infty} \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\vartheta} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\vartheta} = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{F}_n e^{jn\vartheta} \quad (*),$$

$$\dot{F}_n = a_n - jb_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) e^{-jn\vartheta} d\vartheta, \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

де комплексний коефіцієнт

Комплексні зображення синусоїдних функцій (комплексні амплітуди) зв'язані з коефіцієнтами комплексної форми для ряду Фур'є.

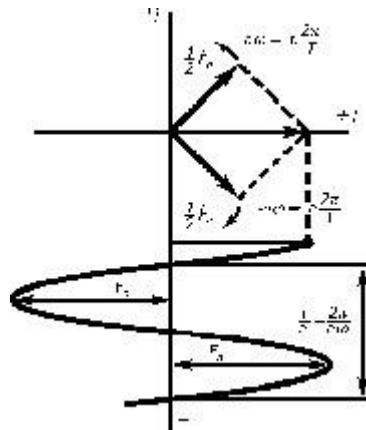
Розглянемо функцію . Її можна зобразити так:

$$E_m \sin \omega t = \text{Im}[\dot{E}_m e^{j\omega t}], \text{ або } E_m \sin \omega t = \frac{1}{2} [\dot{F}_1 e^{j\omega t} + \dot{F}_1^* e^{-j\omega t}].$$

Це сума членів ряду Фур'є для $n = 1$.

Враховуючи що сума двох спряжених членів дорівнює їх подвоєній дійсній частині, будемо мати:

$$\text{Im}[\dot{E}_m e^{j\omega t}] = \text{Re}[\dot{F}_1 e^{j\omega t}], \text{ або } \text{Re}[-j \dot{E}_m e^{j\omega t}] = \text{Re}[\dot{F}_1 e^{j\omega t}].$$



Звідси витікає:

$$\dot{E}_m = j \dot{F}_1.$$

Так як $\vartheta = \omega t$, то ряд (*) це два нескінченних ряди спряжених відносно дійсної вісі векторів, що обертаються у протилежні боки з кутовою швидкістю $n\omega$. Геометрична сума кожної пари спряжених векторів дає тільки дійсне значення.

На рисунку зображена синусоїдна функція, як сума двох спряжених векторів, що обертаються з кутовою швидкістю $n\omega$ у протилежні боки.

1. МЕТРОЛОГІЯ

Вступ. Основні терміни в галузі метрології

Метрологія - наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення потрібної точності. Вимірювання - знаходження значень фізичних величин експериментальним шляхом. Фізична величина - будь-яка властивість матеріального об'єкту, яку можна кількісно визначити. Єдність вимірювань - такий стан вимірювань коли фізичні величини виражені в узаконених одиницях, а значення їх похибок відомі з заданою імовірністю. Метрологія поділяється на теоретичну, прикладну і законодавчу. Теоретична - вирішує загальні наукові проблеми вимірювань. Предметом прикладної метрології є практичне застосування положень теоретичної метрології. Законодавча - полягає у встановленні та контролі за дотриманням спеціальних вимог і правил для забезпечення єдності і потрібної точності вимірювань.

Названі три розділи є взаємопов'язані і мають на меті вирішення ряду завдань, найважливіші серед яких є:

- опрацювання загальної теорії вимірювань;
- розробка теорії певних окремих видів вимірювань;
- розробка теорії фізичних величин, одиниць і систем фізичних величин;
- розробка теорії похибок;
- визначення фізичних констант і стандартних довідкових даних про властивості речовин і матеріалів;
- розробка еталонів і стандартних зразків;
- розробка засобів вимірювання;
- забезпечення правильної експлуатації засобів вимірювальної техніки;
- відтворення розмірів одиниць з допомогою еталонів і передавання їх усім іншим засобам вимірювання;
- нормування метрологічних характеристик засобів вимірювання;
- нормування стандартних вимірювальних процесів і методик виконання вимірювань;
- метрологічний нагляд за засобами вимірювання і правильністю їх застосування.

Порівнюючи окремі завдання можна розрізнити, які з них більше чи менше відповідають окремим трьом розділам метрології, але ніколи їх не можна віднести тільки до одного з них. Однак треба зазначити, що функції прикладної і законодавчої метрологій завжди підпорядковані положенням теоретичної. В свою чергу, положення теоретичної метрології знаходять практичну перевірку при реалізації функцій прикладної та законодавчої метрологій.

Метрологія оперує рядом термінів, що встановлені ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення». Цей стандарт встановлює обов'язкові для використання терміни у всіх видах нормативної документації, науково-технічній, навчально-методичній літературі, що належить до метрології та метрологічного забезпечення, а також робіт зі стандартизації або при використанні результатів цих робіт, включаючи програмні засоби для комп'ютерних систем.

Наведемо характеристику найбільш уживаних з стандартизованих термінів:

фізична величина - властивість, спільна в якісному відношенні для багатьох матеріальних об'єктів та індивідуальна в кількісному відношенні для кожного з них;

розмір (фізичної) величини - кількісний вміст фізичної величини в даному об'єкті;

значення (фізичної) величини - відображення фізичної величини у вигляді числового значення величини із позначенням її одиниці;

істинне значення (фізичної величини) - значення фізичної величини, яке ідеально відображало б певну властивість об'єкта;

умовно істинне значення (фізичної величини) - значення фізичної величини, знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що його можна використати замість істинного для даної мети (*дійсне значення*);

система (фізичних) величин - сукупність взаємопов'язаних фізичних величин, в якій декілька величин приймають за незалежні, а інші визначають як залежні від них;

основна (фізична) величина - фізична величина, що входить до системи фізичних величин і прийнята за незалежну від інших величин цієї системи;

похідна (фізична) величина - фізична величина, що входить до системи величин та визначається через основні величини цієї системи;

розмірність фізичної величини - вираз, що відображає її зв'язок із основними величинами системи;

одиниця (фізичної) величини - фізична величина певного розміру, прийнята за угодою для кількісного відображення однорідних з нею величин;

числове значення (фізичної) величини - число, що дорівнює відношенню розміру фізичної величини, що вимірюється, до розміру одиниці цієї фізичної величини чи кратної одиниці;

вимірювання - відображення вимірюваних величин їх значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів;

пряме вимірювання - вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей;

непряме вимірювання - вимірювання, у якому значення однієї чи кількох вимірюваних величин знаходять після перетворення ряду величини чи обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо;

опосередковане вимірювання - непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду чи обчисленнями за результатами вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функціональною залежністю;

сукупне вимірювання - непряме вимірювання, у якому значення кількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, що пов'язують різне сполучення цих величин, які вимірюються прямо чи опосередковано;

сумісне вимірювання - непряме вимірювання, у якому значення кількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано;

абсолютна похибка (вимірювання) - різниця між результатом вимірювання та умовно істинним значенням вимірюваної величини ;

відносна похибка - відношення абсолютної похибки вимірювання до умовно істинного значення вимірюваної величини;

систематична похибка (вимірювання [засобу вимірювальної техніки]) - складова похибки, що залишається сталою або прогнозовано змінюється у ряді вимірювань тієї самої величини;

випадкова похибка (вимірювання [засобу вимірювальної техніки]) - складова похибки, що не прогнозовано змінюється в ряді вимірювань тієї самої величини;

методична похибка (вимірювання) - складова похибки вимірювання, що зумовлена неадекватністю об'єкта вимірювання та його моделі, прийнятої при вимірюванні;

інструментальна похибка (вимірювання) - складова похибки вимірювання, зумовлена властивостями засобів вимірювальної техніки;

точність вимірювання - головна характеристика якості вимірювання, що відображає близькість результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини;

засіб вимірювальної техніки - технічний засіб, що застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики;

міра (величини) - вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення й збереження фізичної величини за, даного значення;

вимірювальний прилад - засіб вимірювань, у якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації;

метрологічні характеристики - характеристики засобів вимірювань, що нормуються для визначення результату вимірювання та його похибок;

клас точності (засобу вимірювальної техніки [засобу вимірювань]) - узагальнена характеристика засобу вимірювань, що визначається межами його допустимих основної і додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність;

еталон (одиниці фізичної величини) - засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення й збереження одиниці фізичної величини та передавання її розміру відповідним засобам, що стоять нижче за повірочною схемою, офіційно затверджений як еталон;

первинний еталон - еталон, що забезпечує відтворення й зберігання одиниці фізичної величини з найвищою в країні (у порівнянні з іншими еталонами) точністю;

робочий еталон - еталон, призначений для передавання розміру фізичної величини засобам вимірювальної техніки;

метрологічна служба - мережа організацій, окрема організація або окремий підрозділ, на які покладена відповідальність за забезпечення єдності вимірювань у закріпленій за ними сфері діяльності;

метрологічне забезпечення - встановлення й застосування метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для забезпечення єдності й потрібної точності вимірювань;

перевірка засобів вимірювальної техніки - визначення похибок засобів вимірювальної техніки та встановлення придатності їх до застосування.

Усі матеріали наступних питань базуються на правильному розумінні термінів. Тому в тих місцях, де описані терміни часто вживаються, в контексті питання повторюється їх визначення, що дає змогу швидко зорієнтуватися та зберегти цілісність викладеного матеріалу.

1.1. ПОНЯТТЯ ФІЗИЧНОЇ ВЕЛИЧИНИ

1.1.1. Види фізичних величин

Фізична величина (ФВ) це кожна (одна з багатьох) означена якісно властивість фізичних об'єктів (фізичних тіл, їх систем, станів, процесів), яка може мати певний розмір. Приклади ФВ: довжина, маса, швидкість, сила електричного струму, світловий потік. Розмір ФВ є її атрибутом, що існує об'єктивно, незалежно від наших знань про нього. За характером зв'язків розмірів ФВ з об'єктами, яким вони притаманні, їх поділяють на екстенсивні та інтенсивні величини.

Екстенсивні ФВ (маса, довжина, площа, енергія та ін.) при поділі об'єкта на частини змінюють свої розміри і є аддитивними величинами, тобто їх можна додавати або віднімати.

Інтенсивна величина характеризує стан фізичного об'єкту і при його поділі на частини може зберігати свій розмір, наприклад, густина, температура, питомий електричний опір. Інтенсивні ФВ не є аддитивними (густина суміші не дорівнює сумі густини компонентів).

За характером виявлення ФВ поділяються на енергетичні (активні), які здатні самі проявляти свої розміри (температура, напруга) і параметричні (пасивні), опір, індуктивність, ємність, розміри яких проявляються при впливі на об'єкт відповідної активної величини (відповідно активні та пасивні величини визначаються з використанням різних видів вимірювань - прямих та непрямих).

Конкретні ФВ існують в просторі і часі, перебувають в причинно-наслідкових зв'язках з іншими ФВ згідно з законами фізики. Тому розміри ФВ є функціями часу, координат та інших величин.

Розрізняють скалярні і векторні величини. Скалярні - відповідно поділяються на неполярні, що мають тільки розмір (маса, об'єм), і полярні, які мають ще й знак (заряд, напруга). Векторні ФВ (сила, переміщення, швидкість) поруч з розміром мають напрям і отримуються як зміна іншої ФВ в просторі і часі (переміщення - зміна координати в просторі, швидкість - зміна переміщення в часі), а математично описуються похідними.

Розміри ФВ можуть змінюватись неперервно або стрибкоподібно (дискретно). ФВ, розмір якої виражений як функція часу, за визначенням, становить процес, тобто послідовну в часі зміну розміру величини.

1.1.2. Одиниці фізичних величин

Позначимо всі можливі розміри ФВ через X , тобто X - множина розмірів ФВ. Візьмемо серед них довільний розмір X_0 і назовемо його розміром одиниці величини X . Тоді відношення $X/X_0=M$ буде певним числовим значенням величини X і кожний можливий її розмір можна виразити через якесь числове значення. Отже, одиниця ФВ - такий її розмір, якому присвоєно числове значення, що дорівнює 1.

Вимірюванням замість числа M знаходять наближене його значення N , через яке отримують наближене значення ФВ - $x=NX_0$, яке є тільки оцінкою істинного значення величини.

Значення ФВ, яке настільки близьке до істинного її значення, що для даної цілі може бути використане замість істинного, називають дійсним значенням: $x_d=NdX_0$.

ФВ пов'язані поміж собою залежностями, які виражають одні величини через інші. Сукупність пов'язаних такими залежностями величин, серед яких одні умовно вважаються незалежними, а інші виражаються через них, називають системою величин. В системі незалежні величини називаються основними, всі решта - похідними величинами.

Сукупність основних і похідних одиниць певної системи величин становить систему їх одиниць. В побудові системи одиниць вибір основних величин і розмірів їх одиниць теоретично довільний, але практично є продиктований певними раціональними вимогами:

- число основних величин має бути невелике;
- за одиниці мають бути вибрані величини, одиниці яких легко відтворити з високою точністю;
- розміри основних одиниць мають бути такі, щоби на практиці значення всіх величин системи не виражалися ні надто малими, ні надто великими числами;
- похідні одиниці мають бути когерентні, тобто входити в рівняння, що пов'язують їх з іншими одиницями системи, з коефіцієнтом 1.

Одиниці, що не належать ні до основних, ні до похідних одиниць даної системи, називають додатковими. Одиниці, що не входять в жодну з систем, називають позасистемними (літр - l , тонна - t ; градус - $^\circ$ та ін.). До позасистемних одиниць належать також відносні одиниці: процент (відсоток) - $\%$; промілле - ‰ ; мільйонна частина - ppm (млн^{-1}), а також одиниці що визначаються з відношення двох значень величини - логарифмічні одиниці: бел - B , децибел - dB ; октава - $окт$; декада - $дек$; фон - $phon$.

$1 \text{ B} = \lg A_2/A_1$ при $A_2/A_1 = 10$. Це достатньо велика одиниця, тому на практиці частіше застосовують одиницю $1 \text{ dB} = 0.1 \text{ B}$.

У випадку відношення значень струму чи напруги:

$$1 \text{ dB} = 0.1 \text{ B} = 20 \lg x_2/x_1 \text{ при } x_2/x_1 = 10^{1/20} = 1.122.$$

У випадку відношення значень потужності:

$$1 \text{ dB} = 10 \lg P_2/P_1 \text{ при } P_2/P_1 = 10^{1/10} = 1.259.$$

Одиниця, що в ціле число разів більша за системну називається кратною, а - менша за системну називається частковою. Для їх утворення використовують спеціальні префікси: екса-, пета-, фемто-, атто- та ін. Одиниці, від яких утворились кратні або часткові одиниці, називаються головними.

1.1.3. Розмірності фізичних величин

Розмірність (dimension) основної величини - це її позначення L, M, T, I, Θ, N, J, і т.д., а розмірність похідної величини - вираз, що описує її зв'язок з основними величинами системи і становить добуток розмірностей основних величин, піднесених до відповідних степенів. Наприклад, розмірність величини X в системі трьох основних величин LMT

$$\dim X = L^\alpha M^\beta T^\gamma$$

де α, β, γ показники розмірності, які є цілими числами (за винятком систем СГСЕ та СГСМ, де вони можуть бути і дробові).

Величина, в розмірності якої хоча б один показник розмірності не дорівнює нулю, є розмірною величиною, а величина в розмірності якої всі показники розмірності дорівнюють нулю, - безрозмірною величиною. Величина, безрозмірна в одній системі, може бути розмірна в іншій. В певній системі величин розмірність кожної величини однозначна, але є різні за природою величини, які мають однакову розмірність, приклад - енергія та робота. Тому розрізняють фізичну однорідність і розмірну однорідність ФВ.

Операції над розмірностями виконуються за правилами алгебри. Наприклад, якщо величина Z є функцією величин X і Y, тобто

$$Z = f(X, Y),$$

причому

$$\dim X = L^\alpha M^\beta T^\gamma \text{ і } \dim Y = L^\kappa M^\lambda T^\mu$$

то

$$\dim Z = f(L^\alpha M^\beta T^\gamma, L^\kappa M^\lambda T^\mu).$$

Зокрема, якщо

$$Z = XY, \text{ то } \dim Z = L^{\alpha+\kappa} M^{\beta+\lambda} T^{\gamma+\mu},$$

$$Z = X/Y, \text{ то } \dim Z = L^{\alpha-\kappa} M^{\beta-\lambda} T^{\gamma-\mu},$$

$$Z = (X/Y)^n, \text{ то } \dim Z = L^{(\alpha-\kappa)n} M^{(\beta-\lambda)n} T^{(\gamma-\mu)n}.$$

З цих прикладів видно, що внаслідок множення і ділення величин виникають нові величини, у яких свої розмірності і свої одиниці. Їх можна знайти в спеціальних таблицях і нема необхідності всі запам'ятовувати, а простіше отримати на підставі відомих рівнянь зв'язку між величинами. Деякі розмірності корисно запам'ятати, наприклад розмірність сили та енергії:

$$\dim F = LMT^{-2}, \dim E = L^2MT^{-2}$$

Тепер, якщо треба знайти розмірність напруги U , то, враховуючи, що потужність

$$P = E/T = UI$$

знаходимо

$$\dim U = \dim P/I = \dim E/IT = L^2MT^{-3}I^{-1}$$

Розмірності ФВ є одночасно і розмірностями їх одиниць. Рівняння зв'язку між величинами використовуються для утворення когерентних похідних одиниць. Якщо рівняння зв'язку має коефіцієнт, який не дорівнює 1, то в праву його частину підставляють такі значення величин в одиницях даної когерентної системи, щоб їх добуток з коефіцієнтом рівняння дорівнював 1. Наприклад, якщо для утворення одиниці енергії використовується рівняння

$$E = 1/2 mv^2$$

то її когерентна одиниця в системі SI буде

$$\dim E = [E] = 1/2 (2 [m] [v]^2) = 1/2 (2 \text{ кг}) (1\text{м/с})^2 = \text{кг м}^2 \text{ с}^2 = \text{Дж}.$$

Отже одиницею енергії в SI є джоуль, який дорівнює кінетичній енергії тіла масою 2 кг, що рухається з швидкістю 1 м/с.

Розмірність є якісною характеристикою ФВ. Вона відображає її зв'язок з основними ФВ, і залежить від вибору цих величин. М. Планк стверджував, що питання про істинну розмірність будь-якої величини "має не більше сенсу, ніж питання про істинну назву якого-небудь предмету". По цій причині в гуманітарних науках, мистецтві, спорті, кваліметрії, де номенклатура основних величин не визначена, теорія розмірностей не знаходить поки що ефективного застосування. В технічних або точних науках (фізиці, метрології) навпаки, методами теорії розмірності часто вдається отримати важливі самостійні результати. Формальне застосування алгебри розмірностей інколи дає можливість визначити невідому залежність між ФВ.

Приклад: в результаті спостережень встановлено, що при русі по колу сила F , що притискає тіло до опори, певним чином залежить від його швидкості v , маси m і радіуса кола r тобто $F = m^\alpha v^\beta r^\gamma$. Який вигляд цієї залежності.

Розв'язок. На основі алгебри залежностей

$$\dim F = \dim^\alpha m \dim^\beta v \dim^\gamma r.$$

Нам відомо, що

$$\dim F = LMT^{-2}; \dim m = M; \dim v = LT^{-1}; \dim r = L.$$

Звідси

$$LMT^{-2} = M^{\alpha}(LT^{-1})^{\beta}L^{\gamma} = L^{\beta+\gamma}M^{\alpha}T^{-\beta}.$$

Отже, показники розмірності задовольняють рівняння:

$$\beta + \gamma = 1; \alpha = 1; -\beta = -2.$$

Вирішуючи цю систему рівнянь, отримуємо $\alpha = 1; \beta = 2; \gamma = -1$.

Таким чином:

$$F = mv^2/r.$$

Теорія розмірностей має широке застосування для оперативної перевірки правильності складних формул. Якщо розмірність лівої та правої частин не співпадають, то в виводі формули, до якої галузі знань вона не відносилась би, слід шукати помилку.

1.1.4. Види систем одиниць

В 1832 р. К.Ф. Гаусом була розроблена система одиниць, яку він назвав абсолютною, з основними величинами - міліметр, міліграм, секунда. Основні величини запропонованої Гаусом системи відображають найзагальніші властивості матерії - масу і основні форми існування тобто простір і час. В зв'язку з цим її і подібні системи називали абсолютними, хоча це не зовсім відповідає дійсності тому що в кінці минулого віку В. Томсон запропонував систему побудовану на двох основних величинах L і T. Відомі системи з одною основною величиною, а також так звані природні систем одиниць, що базуються на універсальних фізичних константах.

Повними одиницями системи Гауса були міліметр, міліграм і секунда, розміри яких незручні для практики. Тому в 1881 р. Міжнародний конгрес електриків (МКЕ) прийняв систему одиниць СГС з основними одиницями - сантиметр, грам, секунда. Із трьох її різновидів електростатична СГСЕ, електромагнітна СГСМ і симетрична СГС- остання ще й зараз має обмежене застосування в теоретичних розділах фізики і астрономії. Цей самий конгрес прийняв практичні електричні одиниці - см, вольт, ампер і фарад, а в 1889 р. II МКЕ - джоуль, ват і генрі.

В 1901 р. італійський інженер Джорджі запропонував систему МКС з основними одиницями - метр, кілограм, секунда - і показав, що на її основі можна побудувати когерентну практичну систему механічних і електричних одиниць, якщо за четверту основну одиницю взяти одну із практичних електричних одиниць. Був вибраний ампер і виникла когерентна практична система електромагнітних одиниць МКСА, а згодом система теплових одиниць МКСК з четвертою основною одиницею - кельвіном і система світлових одиниць МСК - метр, секунда, кандела. Всі ці системи когерентні і на їх основі побудована Міжнародна система одиниць SI.

Залежно від форми запису рівнянь електромагнітного поля, які використовуються для утворення похідних одиниць, системи одиниць електричних і магнітних величин можуть бути нераціоналізовані і раціоналізовані. Раціоналізація цих рівнянь запропонована в кінці минулого сторіччя англійським фізиком Хевісайдом і полягає в тому, що множник 4π залишається тільки в рівняннях, пов'язаних з сферичною симетрією (закон Гауса, Кулона), а в більшості інших рівнянь відсутній. Тому за однакових розмірів основних одиниць розміри окремих похідних одиниць нераціоналізованої і раціоналізованої систем різні.

1.1.5. Міжнародна система одиниць

В 1960 р. XI Генеральна конференція з мір і ваги (ГКМВ) прийняла Міжнародну систему одиниць (Система інтернаціональна - SI) з основними одиницями - метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, кандела і з додатковими - радіан істерадіан, а в 1971 р. XIV ГКМВ затвердила цьому основну одиницю - моль.

В Україні з 01.01.1999 р. чинними є державні стандарти - ДСТУ 3561.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення, ДСТУ 3561.1-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Похідні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні поняття, назви та позначення, ДСТУ 3561.2-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Фізичні сталі та характеристичні числа. Основні положення, назви, позначення та значення, згідно з якими обов'язковим є застосування одиниць SI (табл. 1), а також часткових і кратних від них.

Метр є довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за проміжок часу що дорівнює $1/299792458$ секунди (XVII ГКМВ. 1983 р.).

Кілограм дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма (I ГКМВ, 1889 р.; III ГКМВ, 1901 р.)

Секунда дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, яке відповідає переходові між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133 (XIII ГКМВ, 1967 р.).

Таблиця 1. Основні і додаткові одиниці SI

Величина		Одиниця		
Найменування	Розмірність	Найменування	Позначення	
			міжнародне	українське
ОСНОВНІ ОДИНИЦІ				
Довжина	L	Метр	m	м
Маса	M	Кілограм	kg	кг
Час	T	Секунда	s	с
Сила електричного струму	I	Ампер	A	А
Термодинамічна температура	Θ	Кельвін	K	К
Кількість речовини	N	Моль	mol	моль
Сила світла	J	Кандела	cd	кд

ДОДАТКОВІ ОДИНИЦІ				
Плоский кут	-	Радіан	rad	рад
Тілесний кут	-	Стерадіан	sr	ср

Ампер дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних проводах нескінченної довжини і знехтовно малої площі поперечного перерізу, розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликає би на кожній ділянці проводу довжини 1 м силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н (IX ГКМВ, 1948 р.).

Кельвін дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води (XIII ГКМВ, 1967 р.).

Моль дорівнює кількості речовини системи, яка вміщує стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг. При застосуванні моля структурні елементи мають бути специфіковані і можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами та іншими частинками або специфікованими групами частинок (XIV ГКМВ, 1971 р.).

Кандела дорівнює силі світла в заданому напрямі джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямі становить $1/683$ Вт/ср (XVI ГКМВ, 1979 р.).

Радіан дорівнює куту між двома радіусами кола, дуга між якими дорівнює радіусу.

Стерадіан дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, яка дорівнює радіусу сфери.

Система одиниць SI - практична, когерентна, раціоналізована. В ній, на відміну від нераціоналізованої системи СГС, магнітна проникність до вільного простору - величина розмірна і називається магнітною сталою:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \approx 12,57^{-7} \text{ Гн/м};$$

подібно електрична стала

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

де $c = (299792,5 \pm 0,4)$ км/с - швидкість поширення світла у вільному просторі.

1.1.6. Практичні рекомендації з правильного застосування елементів системи SI

Треба користуватися термінами "маса" і "густина", а не "вага" і "питома вага", кількість теплоти виражати в джоулях, а не в калоріях. Крім температури Кельвіна (позначення T), допускається застосування також температури Цельсія (позначення t), яка визначається як $t = T - T_0 = T - 273,15$ і виражається в градусах Цельсія °C. Інтервал або різницю температур Кельвіна виражають в Кельвінах (K), а інтервал або різницю температур Цельсія дозволяється виражати як в Кельвінах, так і в градусах Цельсія.

Одиниці SI позначаються літерами латинського і грецького (міжнародні позначення) або українського алфавітів, а також спеціальними знаками (...°;...' ;...'"). На засобах вимірювань мають бути міжнародні позначення. В друкованих виданнях можна застосовувати міжнародні або українські позначення, але не обидва види в одному виданні, за винятком публікацій з фізичних величин.

В позначеннях одиниць, назви яких походять від прізвищ, перша буква має бути велика, наприклад, А, А; W, Вт; Wb, Вб; Ω, Ом. Позначення одиниць проставляються тільки після числових значень величин в один рядок з ними, друкуються прямим шрифтом з пробілом після останньої цифри і без перенесення в наступний рядок. Наприклад, 100 кВт, 80%, 20 °С, але 20°, 30'.

Значення величин і їх граничні відхилення беруться в дужки, після яких з пробілом проставляється позначення одиниці, наприклад, (100,0 ± 0,1) В або ж окремо - після значення величини і після її граничного відхилення: 50,0 В ± 0,2 В,

Позначення одиниць, що входять в добуток, треба відділяти крапкою на середній лінії (знак множення): Н•м, кг•м².

В позначеннях відношень одиниць знаком ділення може служити тільки одна скісна або горизонтальна риска. Позначення зі скісною рискою записують в один рядок, а знаменник-добуток беруть у круглі дужки. Дозволяється позначення відношень одиниць записувати у вигляді добутку позначень одиниць, піднесених до додатних чи від'ємних степенів, але якщо для однієї з одиниць, що входять у відношення, встановлено позначення у вигляді від'ємного степеня, то застосовувати скісну чи горизонтальну риску не дозволяється.

1.2. ВИМІРЮВАННЯ

1.2.1. Вимірювання і вимірювальна інформація

1.2.1.1. Поняття вимірювання і вимірювальної інформації

Поняття вимірювання можна визначити як пізнавальний процес, який полягає у порівнянні шляхом фізичного експерименту даної фізичної величини з певним її значенням, яке взято за одиницю порівняння.

На початку 60-х років виникли спроби визначити поняття вимірювання в інформаційному аспекті. У визначеннях, що запропоновані різними авторами, вимірювання трактується як перетворення і одержання інформації про значення ФВ. Загальновизнаного визначення поняття вимірювання в інформаційному аспекті ще немає.

Згідно з ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни і визначення, вимірювання - відображення вимірюваних величин їх значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів (можна порівняти з поширеним визначенням, що було дане в ГОСТі 16263-70 вимірювання - знаходження значень ФВ дослідним шляхом з допомогою спеціальних

технічних засобів). Вимірювальна інформація - інформація про значення вимірюваних ФВ. Ці стандартні визначення не викликають сумнівів щодо правильності і приваблюють своєю лаконічністю. Проте, оскільки ці поняття не належать до елементарних, їх суть нелегко викласти у лаконічно сформульованих визначеннях.

Специфіка поняття вимірювання проявляється в трьох його ознаках, поєднанням яких воно відрізняється від суміжних понять.

Перша ознака характеризує безпосередню мету вимірювань - знайти значення даної конкретної величини. У згаданих визначеннях ця ознака відображається висловами "пізнавальний процес", "одержання інформації", "знаходження значень величин".

Друга ознака - шлях, яким знаходять значення вимірюваної величини. Це - фізичний експеримент (дослід), який здійснюється за допомогою спеціальних технічних засобів.

Третя ознака - сутність знаходження значення вимірюваної величини, якою є порівняння інформації про даний розмір величини з інформацією про розмір її одиниці або про певний інший її розмір (відносні вимірювання).

З врахуванням цих ознак поняття вимірювання можна визначити як знаходження значень ФВ дослідним шляхом з допомогою спеціальних технічних засобів на підставі порівняння інформації про даний розмір величини з інформацією про розмір її одиниці або про певний інший її розмір.

Загальновизнаного визначення поняття інформації ще нема. Існує думка, що воно належить до первинних понять і визначенню не підлягає. *У загальному аспекті інформація як філософська категорія виражає об'єктивну властивість матерії бути різноманітною.*

Інформація про розмір ФВ міститься в самій цій величині, існує об'єктивно і незалежно від того, підлягав величина вимірюванню чи ні. Очевидно, якщо величина вимірюванню не підлягає, то інформація про її розміри не є вимірювальною. Інформація про розміри вимірюваної величини стане вимірювальною тоді, коли буде поданою як добуток її істинних числових значень на розмір одиниці ФВ.

Множина істинних значень вимірюваної величини і множина її істинних числових значень є імовірнісними множинами, що пов'язані між собою через вибрану одиницю, яка відіграє роль коду. Отже, множина істинних числових значень вимірюваної величини становить вимірювальну інформацію про розмір ФВ.

Вимірювальна інформація, що міститься у вимірюваній ФВ, в процесі її добування перетворюється і частково втрачається. Внаслідок втрат одержана вимірювальна інформація про значення вимірюваної величини, тобто здобута в процесі вимірювання, кількісно дещо відрізняється від вимірювальної інформації, що міститься в цій величині.

1.2.1.2. Вимірювальні сигнали, перетворення вимірювальних сигналів, форми вимірювальної інформації

В ІВТ як і в техніці зв'язку, сигналом називається матеріальний носій інформації, який фізично є енергетичним процесом. Тому вимірювальний сигнал - енергетичний носій вимірювальної інформації. Активна (але не пасивна) ФВ сталої інтенсивності - граничний

випадок енергетичного процесу; отже вона може стати сигналом. Пасивна (параметрична) ФВ, хоча є матеріальним носієм інформації, однак не є сигналом, бо фізично не є енергетичним процесом і сама не може проявити свій розмір, у якому міститься вимірювальна інформація. Її можна отримати, якщо сформувати вимірювальний сигнал, використовуючи цю пасивну ФВ, і далі, при необхідності, перетворити його так, щоб вимірювальна інформація набула форми, в якій вона придатна для використання за призначенням.

Добування вимірювальної інформації про розміри ФВ здійснюється формуванням і перетворенням вимірювальних сигналів шляхом модуляції і кодування за допомогою засобів вимірювань з використанням допоміжних технічних засобів, в тому числі обчислювальних. Для формування і перетворення вимірювальних сигналів, обов'язковою є наявність відповідного носія, здатного сприймати вимірювальну інформацію і відображати її у вигляді зміни (приросту) своїх інформаційних параметрів.

Основу процесів відображення інформації при формуванні і перетворенні вимірювальних сигналів становлять модуляція і кодування, які органічно пов'язані між собою і окремо не існують. Модулюються інформаційні параметри носія інформації, а кодується вимірювальна інформація. Кодування - відображення різноманітності однієї множини різноманітністю іншої. Відображення фізичним аналогом називається аналоговим кодуванням. Відображення інформації умовними знаками (символами), зокрема цифровими, називається цифровим кодуванням. Відповідно до цього відрізняють аналогові та цифрові вимірювальні сигнали і аналогову та цифрову форми вимірювальної інформації.

Неперервний чи дискретизований за часом або простором, континуальний або квантований за рівнем вимірювальний сигнал є аналоговим. Дискретизований і квантований аналоговий сигнал, будучи дискретним, стає цифровим тільки після цифрового кодування. Цифровий сигнал завжди дискретний, але терміни "цифровий" і "дискретний" ототожнювати не можна. Не можна також називати кодом цифрове значення величини, а також її числове значення.

Звернемо увагу на відмінність термінів "інформаційний" та "інформативний" параметри. Інформаційним називається такий параметр носія інформації, який може сприймати інформацію при формуванні чи перетворенні вимірювального сигналу. Інформативний параметр носія інформації - це вже якийсь конкретний параметр, який відображає інформацію. В протилежність до нього всі інші параметри носія інформації називають неінформативними.

Перетворення вимірювальних сигналів, очевидно, не є самоціллю, це - спосіб матеріальної реалізації перетворення вимірювальної інформації, а саме

$$Y \equiv Y(X) = K\{X\} = K\{M_X * 1_X\} = K\{M_X\} * K\{1_X\} = M_Y * 1_Y$$

де 1_X , 1_Y , M_X , M_Y одиниці та істинні числові значення (інформація) перетворюваної X на Y величин згідно з кодом K , причому через наявність похибок перетворення мають місце втрати кількості інформації.

1.2.1.3. Поняття результату і похибки вимірювання

Експериментатор, виконуючи операції процесу вимірювань, одержує результати спостережень про значення вимірюваної величини, які називають результатами спостережень при

вимірюваннях. Вони можуть бути однократними (одноразовими) або многократними (багаторазовими). Результати спостережень при вимірюваннях ще не є результатами вимірювань.

Результат вимірювання, як значення величини, що знайдене шляхом її вимірювання, одержують після відповідної обробки результатів спостережень, на основі якої визначають кількісні показники точності і вибирають форму подання результату вимірювання згідно з відповідними державними стандартами. У випадку однократного спостереження результат вимірювання знаходять, оцінюючи за відомими метрологічними характеристиками засобів вимірювань границі, в яких за даних умов із заданою ймовірністю може бути значення похибки вимірювання і подають результат у належній стандартній формі.

Отже, результат вимірювання - це знайдене значення вимірюваної величини з стандартною оцінкою його точності, яка визначається характеристиками похибки вимірювань. Звідси виходить, що необхідно уміти коректно оцінювати значення похибок результатів вимірювань.

$$\Delta = x - X$$

За визначенням абсолютна похибка є різницею наближеного x і взятого (прийнятого) за точне X значень величини. Похибка Δ абсолютна не в розумінні модуля, тобто додатного числа, а в сенсі її розмірності $\dim \Delta = \dim X$, оскільки залежно від співвідношення між значеннями x і X вона може бути довільного знаку. Віднімання X від x , а не навпаки, не є тільки умовним, тому що $x = X + \Delta$ означає, що неточність виникає внаслідок додавання похибки (плюсової чи від'ємної) до точного значення.

У поданому виразі через x позначається значення результату вимірювання, а через X , при теоретичному аналізі, - істинне значення вимірюваної величини, але оскільки воно точно не відоме то при практичному оцінюванні похибок його замінюють дійсним значенням x_d , похибка визначення якого в 3-10 разів менша за похибку Δ .

Абсолютна похибка не дає повного уявлення про точність вимірювання. Тому користуються поняттям відносної похибки

$$\delta = \Delta / X$$

і номінальної відносної похибки

$$\delta_n = \Delta / x,$$

різниця між якими

$$\delta - \delta_n = \Delta / X - \Delta / x = (x - X) * \Delta / X * x = \delta * \delta_n$$

є дуже малою величиною і різко зменшується з підвищенням точності. Наприклад, якщо $\delta = 0.01 = 1\%$, то $\delta - \delta_n \approx 0.0001 = 0.01\%$. Однак, якщо відносна похибка становить біля 10%, то її вже треба оцінювати як $\delta = \Delta / x_d$.

Для порівняння характеристик точності засобів вимірювань краще підходить зведена похибка, значення якої визначається відношенням

$$\gamma = \Delta / X_n$$

де X_n - нормуюче значення величини X , вибір якого регламентує державний стандарт.

Подані вирази - це спрощені моделі похибок. Практично значення похибок залежать від значень вимірюваних чи перетворюваних величин та інших аргументів, що враховуються далі відповідним ускладненням їх моделей. Оскільки ні точні значення похибок, ні їх знаки взагалі не відомі, то вони трактуються як випадкові величини і процеси.

1.2.2. Поняття, що пов'язані з вимірюванням

1.2.2.1. Принцип, метод, режим, алгоритм і процес вимірювання

Принципом вимірювань називають сукупність явищ, на яких базується вимірювання, наприклад, вимірювання температури з використанням термоелектричного ефекту; вимірювання напруженості магнітного поля з використанням ефекту Холла.

Метод вимірювань - спосіб використання принципів і засобів вимірювань, його основна ознака - це спосіб виконання операції порівняння. *Класифікація методів вимірювань розглядається в п. 1.2.3.3.*

Режим вимірювань - статичний або динамічний - визначається характеристиками засобів вимірювань, вхідних сигналів і тривалістю їх перетворення. Статичний режим буває тоді, коли вхідний сигнал є сталою величиною або стаціонарним процесом, пов'язана з ним вимірювана величина не залежить від часу (середнє, середнє квадратичне значення), а тривалість вимірювання достатня для погасання перехідних процесів у колі перетворення, що виникли при поданні сигналу на його вхід (наприклад, для заспокоєння рухомої частини електромеханічного приладу).

Динамічний режим є при вимірюванні миттєвих значень змінних величин, а також значень сталих величин чи інтегральних значень стаціонарних процесів, якщо тривалість перетворення не достатня для усталення вихідного сигналу. Теоретично режим вимірювань завжди динамічний, а статичним режим є певним наближенням, коли можна нехтувати динамічною складовою похибки перетворення.

Алгоритм вимірювань - детермінований (регулярний) або стохастичний (нерегулярний) - це сукупність правил підготовки і виконання операцій процесу вимірювань. Стохастичні алгоритми, ґрунтовані на методі статистичних випробувань Монте-Карло, забезпечують достатню точність порівняно нескладних автоматичних засобів вимірювань, побудованих, з використанням мікропроцесорних елементів. Точність і функціональні можливості таких засобів визначаються в основному якістю генератора шумового сигналу з заданою густиною розподілу.

Процес вимірювань як сукупність операцій перетворення вимірювальної інформації за певним алгоритмом, який визначав послідовність їх виконання в часі залежно від ступеня необхідної участі в ньому експериментатора, може бути неавтоматизованим, автоматизованим і автоматичним.

1.2.2.2. Методики виконання вимірювань

Поєднання методу і алгоритму вимірювань становить методику вимірювань. Методика вимірювань, в якій вимоги до виконання вимірювань регламентовані відповідним нормативно-

технічним документом (НТД), називається методикою виконання вимірювань (МВВ). Під МВВ розуміють також НТД, який регламентує вимоги до виконання вимірювань за даною методикою. Дотримання виконання МВВ забезпечує задекларовану гарантовану точність вимірювань. МВВ поділяються на типові і конкретні або індивідуальні. Типові МВВ, що оформлені у вигляді відповідних НТД, є керівними технічним матеріалом для розробки конкретних МВВ, які призначені вже для безпосереднього використання при плануванні і реалізації процесів вимірювань на робочих місцях. МВВ, що регламентовані стандартами, називаються стандартизованими, а МВВ, що регламентовані атестатами, - атестованими. При атестації МВВ визначаються показники точності вимірювань, які досягаються при дотриманні цієї МВВ. Згідно з ще діючим між державним стандартом ГОСТ 8.010-90 вимірювання за стандартизованими МВВ мають виконуватися засобами вимірювань, що пройшли державні випробування згідно з ДСТУ 3400-96. Вимірювання за атестованими МВВ можуть виконуватися і засобами вимірювань, метрологічні характеристики яких визначені конкретно при їх метрологічній атестації. Зокрема, до таких належать нестандартизовані засоби вимірювань, або засоби вимірювань, що застосовуються в ненормованих робочих умовах. Їх метрологічне забезпечення здійснюється згідно з ДСТУ 3215-95.

Основні вимоги до структури і змісту МВВ регламентує ГОСТ 8.010-90, згідно з яким стандартизовані МВВ можуть бути окремими стандартами або відповідними розділами стандартів на технологічні процеси, на методи і засоби перевірки засобів вимірювань, а також на методи випробувань і контролю продукції. В них мають бути вказані:

- призначення МВВ;
- норми похибок вимірювань, встановлені початковими вимогами, або значення характеристик похибок, що гарантуються при застосування МВВ;
- вимоги до засобів вимірювань і допоміжних пристроїв, що необхідні для виконання вимірювань;
- метод (алгоритм) вимірювань;
- вимоги безпеки;
- вимоги до кваліфікації операторів;
- умови вимірювань;
- підготовка до виконання вимірювань
- виконання вимірювань;
- способи обробки результатів спостережень при вимірюваннях;
- оформлення результатів вимірювань;
- контроль похибки МВВ з вказанням методу і періодичності.

В атестатах атестованих МВВ мають бути вказані:

- призначення і конкретне застосування даної МВВ;

- типи і номери екземплярів засобів вимірювань, що використовуються при виконанні вимірювань;
- технічні характеристики допоміжних пристроїв;
- метод і алгоритм вимірювань;
- числові значення-показників точності;
- міжповірочний інтервал засобів вимірювань і номенклатура НТД, що їх регламентують;
- вимоги до кваліфікації операторів і до охорони праці.

Дещо різні вимоги до стандартизованих і атестованих МВВ зумовлені відмінністю їх призначення - як типових і конкретних МВВ.

1.2.2.3. Лічба, контроль, розпізнавання образів, діагностика стану об'єктів і їх зв'язок з вимірюваннями

Лічба однорідних об'єктів має ознаки вимірювання. Кожний з злічуваних об'єктів репрезентує одиницю їх кількісного вмісту. На лічбі ґрунтуються всі перетворення цифрових сигналів і саме цифрове кодування вимірювальної інформації, як числових значень вимірюваних чи перетворюваних величин. Тому між лічбою і вимірюванням існує незаперечний прямий зв'язок.

Контроль і вимірювання - поняття взаємопов'язані але не тотожні, хоча інколи вони й збігаються. Контролю піддають матеріали що надходять у виробництво, операції виробничих процесів, параметри деталей, характеристики вузлів і готової продукції тощо. При контролі немає необхідності знати значення величин (параметрів), що підлягають контролю, а треба тільки перевірити, чи вони знаходяться в межах заданих норм, чи поза ними. Прикладом може служити контроль розмірів деталей за допомогою калібрів.

Норми можуть бути задані по-різному, залежно від характеру параметрів об'єкта контролю і призначення його результатів:

- у вигляді зразків такої ж фізичної природи, що і контрольована величина;
- у вигляді імітаторів зразків;
- у вигляді числових значень.

В останньому випадку контроль здійснюється з використанням вимірювальних операцій (тобто поняття контролю і вимірювання збігаються).

Поняття контролю і вимірювання можна трактувати як аспекти або й елементи поняття розпізнавання образів, теорія якого набуває все ширшого і глибшого розвитку внаслідок практичного використання робототехніки не тільки в автоматизації виробничих процесів але і в інших ділянках діяльності людини на шляху науково-технічного прогресу. В робототехніці однією із головних є проблема штучного інтелекту, у вирішенні якої важливе місце має створення технічних засобів моделювання органів чуття живих організмів - зору слуху, дотику, смаку і нюху.

В теорії розпізнавання образів використовується спеціальна термінологія. Досліджуваний об'єкт називають оригіналом, елементи, які сприймають інформацію про оригінал, - рецепторами, а їх сукупність - рецепторним полем. Реакція рецептора на оригінал має назву зображення, а для розпізнавання образів необхідним є забезпечення інформаційної еквівалентності зображення і оригінала.

Величини, якими описуються властивості образів, називають ознаками розпізнавання. Сукупність ознак, що відносяться до даного образу, називають класом. Тому говорять про класифікацію об'єктів, а задача розпізнавання зводиться до порівняння за ознаками розпізнавання певного зразкового образу з даним об'єктом і констатації, чи відноситься цей об'єкт до даного образу. Для вирішення цього питання використовують певні критерії відповідності, які служать мірами розбіжності між розпізнаним і зразковим образами.

На розпізнаванні образів з використанням операцій контролю і вимірювань ґрунтується діагностика стану технічних об'єктів, тобто технічна діагностика - наукова дисципліна, яка вивчає форми прояву відмов в технічних системах, розробляє методи їх виявлення і принципи побудови діагностичних систем.

На підставі математичної моделі об'єкта, що підлягатиме діагностуванню методами системотехніки з використанням апарату алгебри логіки будуються автоматичні діагностичні системи і складаються програми діагностики. Сукупність контрольних перевірок, що достатня для визначення стану об'єкта діагностики, називається діагностичним тестом. Підвищення ефективності діагностичних тестів досягається вже на стадії проектування об'єктів з врахуванням необхідності їх діагностування, якому вони підлягатимуть не тільки при виникненні відмова, але й у придатному стані, щоб прогнозувати можливість їх появи. У випадку виникнення відмов здійснюється автоматичний пошук несправностей для їх локалізації.

1.2.2.4. Засоби, методи і алгоритми контролю

З викладеного виходить, що поняття контролю використовується в багатьох аспектах, але для інженера важливим переважно є контроль якості продукції. Якість продукції (виробів) - це ступінь її придатності для використання за призначенням, який визначається станом параметрів, що описують її властивості.

За умови, що проектні (номінальні) значення параметрів вибрані правильно, якість продукції визначається за відхиленнями від цих значень. Тому для забезпечення потрібної якості здійснюють контроль значень параметрів матеріалів, що використовуються у виробництві деталей, які з них виготовляються, складених і з цих деталей вузлів, а також готових виробів, в тому числі на стадії їх експлуатації. Контроль полягав в експериментальному оцінюванні значень параметрів.

Засоби, методи і алгоритми контролю визначаються видом і фізичним характером параметрів, а також ступенем автоматизації процесів контролю. З точки зору контролю якості продукції її параметри поділяються на прості, узагальнені і параметри ефективності.

Прості параметри безпосередньо контролюють за допомогою засобів вимірювань або калібрів, тобто безшкальних вимірювальних інструментів, під час виконання технологічних операцій, що дає можливість коректувати якість протікання технологічного процесу, або після їх

завершення, а також на готових виробах, причому без будь-яких додаткових обчислень. Таким контролем перевіряють, чи не виходить значення простого параметра за допустимі межі. Межі можуть бути задані як "від - до", наприклад, розмір діаметра деталі, або у вигляді твердження "...не перевищує допустимого значення", "... не менше за допустиме значення, наприклад вхідний опір приладу. На основі одержаних таким чином результатів контролю приймають рішення за простим критерієм "придатний - непридатний".

Узагальнені параметри є функціями простих параметрів і виражають функціонально-експлуатаційні властивості готових виробів, а їх контроль здійснюють з використанням засобів вимірювань і обчислювальних пристроїв.

Параметри ефективності є функціями узагальнених параметрів, служать імовірнісними показниками придатності продукції для її використання за призначенням порівняно з іншою продукцією такого ж призначення, а також для прогнозування її якості на майбутнє.

Засоби контролю можуть бути аналогові і цифрові, їх види і складність залежать від виду і фізичної природи параметрів, а також від потрібного ступеня автоматизації процесів контролю.

Методи контролю визначаються поєднанням способів використання фізичних принципів і засобів контролю. Застосовують активний контроль, який здійснюється в процесі формування розміру параметра (обробка деталі, підгонка опору резистора, тощо) і запобігає виникненню браку, а також пасивний контроль параметрів виготовлених деталей і вузлів, який може бути 100%-ним і вибіркоvim.

Поняття алгоритму контролю аналогічне поняттю алгоритму вимірювань. Основний показник контрольних операцій - вірогідність їх результатів, а не точність, хоча вона посередньо враховується. Можна говорити про методику виконання контролю як поєднання його методу і алгоритму. В умовах виробництва у більшості випадків MBV по своїй суті є методиками виконання контролю, оснований на використанні вимірювань.

Внаслідок випадкового характеру значень параметрів і похибок контролю з певною ймовірністю можуть бути забраковані вироби придатні (ризик виробника), а також визнані придатними вироби, які насправді є браком (ризик замовника). Тому в контролі якості продукції важливі ролі відіграють теорії ймовірностей і математичної статистики, зокрема питання перевірки гіпотез.

1.2.3. Класифікація вимірювань

1.2.3.1. Види вимірювань

Повної сталої і загальновизнаної класифікації вимірювань немає. Практично використовують певний варіант неповної класифікації, який відповідає призначенню.

Розглянемо декілька прикладів класифікацій вимірювань за певними ознаками:

- за наявністю розмірності – розмірні, безрозмірні;

- за наявністю попереднього вимірювального перетворення – безпосередні (вимірювана величина (BV) вимірюється без будь-яких попередніх перетворень шляхом порівняння з

величиною міри), з попереднім перетворенням (ВВ попередньо перетворюється у величину, однорідну з величиною міри, після чого відбувається порівняння)

- за співвідношенням між числом n вимірюваних величин і числом m рівнянь вимірювань ($n < m$, $n = m$, $n > m$);

- за способом здійснення умови $m > n$ (повторне вимірювання m раз, m -канальне вимірювання).

Однією з найбільш поширених ознак, за якою визначають види вимірювань - прямі, непрямі (опосередковані, сукупні та сумісні), - є характер співвідношень, на підставі яких знаходять значення вимірюваних величин.

Вимірювання пряме, якщо значення вимірюваної величини знаходять безпосередньо з дослідних даних, наприклад, вимірювання довжини лінійкою з поділками, потужності - ватметром. На противагу прямим - опосередковані, сукупні та сумісні вимірювання називають непрямыми.

Опосередкованим називають вимірювання ($n=1$) однієї величини X , значення якої x знаходять за результатами $u, v, \dots, w$, прямих вимірювань величин $U, V, \dots, W$, з якими величина X пов'язана явною функціональною залежністю

$$X = F(U, V, \dots, W).$$

Наприклад, питомий електричний опір

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4} \frac{R}{l}$$

знаходять за значеннями опосередкованих вимірювань опору R , довжини l і діаметру d провідника з круглим перерізом; значення потужності $P = UI$ постійного струму або опору $R = U/I$ знаходять за результатами прямих вимірювань напруги U вольтметром і сили струму I амперметром.

Опосередковані вимірювання виконують тоді, коли значення величини неможливо або складно виміряти прямо або якщо вони забезпечують вищу точність, ніж прямі.

Сумісними називають вимірювання $n \geq 2$ неоднорідних величин $U, V, \dots, Z$, значення яких $u, v, \dots, z$ знаходять за результатами $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ прямих або опосередкованих вимірювань величин $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}$, через які величини $U, V, \dots, Z$, пов'язані між собою системою m -умовних (емпіричних) рівнянь

$$F_i(U, V, \dots, Z; X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}) = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \text{ причому } m \geq n$$

Прикладом сумісних вимірювань може також бути визначення температурних коефіцієнтів опору за результатами прямих вимірювань опору резистора і його температури. Сумісні вимірювання використовуються також для визначення функціональних залежностей між величинами.

Наприклад, відомо, що індуктивність котушки $L = L_0(1 + \omega^2 CL_0)$, де L_0 - індуктивність на частоті $\omega = 2\pi f \rightarrow 0$; C - міжвиткова ємність.

Значення C і L_0 не можна знайти прямими або опосередкованими вимірюваннями. Тому в найпростішому випадку, коли $m=2$, вимірюють індуктивність котушки $L_1=X_{11}$ при $\omega_1=X_{12}$ і $L_2=X_{21}$ при $\omega_2=X_{22}$ і складають систему рівнянь

$$L_1=L_0(1+\omega_1^2CL_0),$$

$$L_2=L_0(1+\omega_2^2CL_0),$$

розв'язуючи яку, знаходять C і L_0

Сукупними називають вимірювання $n \geq 2$ однойменних величин $X_1, X_2, \dots, X_n$, значення яких $x_1, x_2, \dots, x_n$ знаходять за результатами $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ прямих вимірювань величин $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}$, які є комбінаціями величин $X_1, X_2, \dots, X_n$, і пов'язані з ними системою m -умовних рівнянь

$$F_i(X_1, X_2, \dots, X_n; X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})=0$$

$$i=1, 2, \dots, m, \text{ причому } m \geq n$$

Наприклад, щоб знайти значення r_1, r_2, r_3 опорів R_1, R_2, R_3 резисторів, що сполучені трикутником, вимірюють опори R_{12}, R_{23} , і R_{31} на кожній парі вершин трикутника і, якщо $m=n$, отримують системи рівнянь, що пов'язують значення опорів. Розв'язуючи систему 3-х рівнянь, знаходять значення опорів r_1, r_2, r_3 .

Для підвищення точності сумісних і сукупних вимірювань, забезпечують умову $m > n$ і систему несумісних умовних рівнянь розв'язують, застосовуючи метод найменших квадратів.

1.2.3.2. Абсолютні і відносні, аналогові і цифрові, звичайні та статистичні вимірювання

Згідно з стандартом ДСТУ 2681-94 вимірювання називається абсолютним, якщо воно базується на прямих вимірюваннях однієї або декількох основних величин і використанні значень фізичних констант, а відносним - вимірювання відношення величини до однойменної, яка відіграє роль одиниці, або вимірювання зміни величини по відношенню до однойменної, що взята за початкову.

Ознакою поділу вимірювань на аналогові і цифрові служить форма вимірювальної інформації, яку несе інформативний параметр вихідного сигналу засобу вимірювань. Результат вимірювань завжди має цифрову форму, але операції квантування і цифрового кодування в аналогових вимірюваннях виконує людина, а в цифрових вони здійснюються автоматично.

Ознакою поділу вимірювань на звичайні і статистичні служить відповідно відсутність і наявність статистичної обробки результатів спостережень. Всі вимірювання (прямі і непрямі) з однократними (одноразовим) спостереженнями - звичайні, а з багатократними (багаторазовим) - статистичні. Вимірювання з багаторазовими спостереженнями називають рівноточними, якщо вимірювана величина і умови вимірювань незмінні, а засоби вимірювань і експериментатор ті самі; якщо ж хоча б одна з цих умов не виконується, то вимірювання вже будуть нерівноточними.

1.2.3.3. Класифікація методів вимірювань

З визначення поняття вимірювання випливає, що неодмінною його операцією є порівняння інформації про розміри величин. Згідно з ДСТУ 2681-94 метод вимірювання - сукупність способів

використання засобів вимірювальної техніки та принципу вимірювань для створення вимірювальної інформації; розрізняють 6 методів:

1 - метод зіставлення (Messmethode mit direktem Vergleich) - метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вимірюваної величини з усіма вихідними величинами багатозначної нерегульованої міри. *Приклади* 1. Вимірювання довжини лінійкою з поділками. 2. Вимірювання інтервалу часу годинником.

2 - метод одного збігу (метод ноніуса) - метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вихідних величин двох багатозначних нерегульованих мір, з різними за значеннями ступенями, нульові позначки яких зсунуті між собою на вимірювану величину. *Приклади* 1. Вимірювання довжини за допомогою двох лінійок з поділками, ціни яких знаходяться в певному відношенні (штангенциркуль). 2. Вимірювання часу за допомогою двох послідовностей періодичних імпульсів, періоди яких знаходяться в певному відомому відношенні.

Метод збігу полягає в тому, що різниця між ефектами, які викликані діями вимірюваної і зразкової величини, визначається за збігом шкал або періодичних сигналів. (Приклади: вимірювання довжини штангенциркулем з ноніусом та частоти стробоскопом).

3- метод подвійного збігу (метод коінциденції, Koinzidenzmessmethode) - метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням двох квантованих фізичних величин: вимірюваної та відтворюваної багатозначною нерегульованою мірою. *Приклади* 1. Вимірювання зістикованих інтервалів часу за допомогою послідовності періодичних імпульсів з відомим значенням їх періоду. 2. Вимірювання зістикованих відрізків довжини за допомогою лінійки з відомим значенням поділок.

4 - метод зрівноваження з регульованою мірою (Nullmessmethode) - метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням вимірюваної величини та величини, що відтворюється мірою, яка регулюється, до їх повного зрівноваження. *Приклад* Вимірювання електричної напруги компенсатором; зважування на рівноплечих терезах (метод протиставлення).

Цей метод ще має назву - нульовий метод вимірювання, бо відрізняється тим, що результуючий ефект дії вимірюваної X і зразкової X_3 величин на пристрій порівняння доводять до нуля.

5 - диференційний метод (різницевий метод, Differentielle Messung) - метод вимірювання, за яким невелика різниця між вимірюваною величиною та вихідною величиною одноканальної міри вимірюється відповідним засобом вимірювання.

Диференціальний метод вимірювань полягає в тому, що на вимірювальний прилад діє різниця вимірюваної X і зразкової X_3 величин, тобто $\Delta X = X - X_3 < X_3$, а результат вимірювання визначається як $x = X_3 + \Delta X$, причому похибка вимірювання величини X визначається практично похибкою відтворення зразкової величини X_3 .

6 - метод заміщення (Substitutions-Messmethode) - метод непрямого вимірювання з багаторазовим порівнянням до повного зрівноваження вихідних величин вимірювального перетворювача з почерговим перетворенням ним вимірюваної величини та вихідної величини регульованої міри (метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой).

Метод заміщення - метод вимірювань, при якому ефект діяння вимірюваної величини на пристрій порівняння (компаратор, вимірювальний прилад) запам'ятовується, а потім відновлюється діянням на нього зразкової величини. Приклад - вимірювання опору неточною мостовою схемою з застосуванням заміщуючого магазину опору.

З визначень диференціального і нульового методів вимірювань випливає, що вони є окремими випадками інших методів порівняння з мірою, причому кожний з них визначається ступенем повноти реалізації цих методів. Нульовий метод має місце при повній компенсації, повному протиставленні, заміщенні чи збігу (в межах можливостей компаратора), а диференціальний - при неповній реалізації цих методів.

Компенсаційний метод вимірювань полягав в тому, що на вході пристрою порівняння (компаратора) одночасно діють дві величини - полярна або векторна вимірювана і такої ж фізичної природи зразкова величина, розмір якої відтворюється мірою, а співвідношення між їх розмірами визначається за вихідним сигналом пристрою порівняння. Приклад - вимірювання напруги постійного струну за допомогою компенсатора шляхом її порівняння з ЕРС нормального елемента.

1.3. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

1.3.1. Класифікація засобів вимірювань

1.3.1.1. Поняття і види засобів вимірювань

Засобами вимірювальної техніки (ЗВТ) називають технічні засоби, які застосовуються під час вимірювань і мають нормовані метрологічні характеристики (МХ). Метрологічними називаються ті характеристики засобів вимірювань, від яких залежить точність результатів, одержаних за їх допомогою. Нормування метрологічних характеристик полягав в законодавчому регламентуванні їх складу і нормативних значень.

До засобів вимірювальної техніки відносяться засоби вимірювань (ЗВ) та вимірювальні пристрої. Засіб вимірювання це ЗВТ, який реалізує процедуру вимірювань. Види ЗВ: вимірювальні прилади, вимірювальні канали, вимірювальні системи, кодові ЗВ (АЦП), реєструвальні ЗВ. Вимірювальний пристрій (ВП) - ЗВТ, в якому виконується лише одна зі складових частин процедури вимірювань (вимірювальна операція). ВП це міри, набори і магазини мір, компаратори, вимірювальні перетворювачі (давачі, сенсори), масштабні перетворювачі та обчислювальні компоненти.

Міра - ВП, що реалізує відтворення та (або) збереження ФВ заданого розміру (однозначна міра) або ряду розмірів (багатозначна міра). Набір мір - спеціально підібраний комплект конструктивно відокремлених мір, які можуть використовуватися не тільки окремо, але й в різних комбінаціях для відтворення ряду розмірів даної ФВ (наприклад, набір гир, вимірювальних резисторів, конденсаторів). Набір мір, конструктивно об'єднаних в одне ціле з пристроєм для вмикання їх у різних комбінаціях, називається магазином мір. Наприклад, магазин опору, індуктивності, ємності.

Вимірювальний перетворювач - ВП, що реалізує вимірювальне перетворення вхідного вимірювального сигналу на вихідний сигнал, зручний для дальшого перетворення, обробки, зберігання чи передавання вимірювальної інформації, але не для безпосереднього сприймання спостерігачем. Наприклад, калібрований шунт, вимірювальний трансформатор, атестована термопара. Первинний вимірювальний перетворювач (сенсор) перший взаємодіє з об'єктом вимірювань.

Вимірювальний прилад - ЗВ, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації, який придатний для безпосереднього сприймання спостерігачем завдяки наявності відлікового пристрою (шкала з вказівником, цифрове табло), наприклад, вольтметр, ватметр, термометр.

Вимірювальна система (ВС)- сукупність вимірювальних каналів (ЗВ і засобів зв'язку, для створення сигналу про одну ФВ), вимірювальних пристроїв та інших технічних засобів об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації про декілька вимірюваних ФВ. Найчастіше ВС призначена для вироблення сигналів у формі, придатній для автоматичної обробки, передачі і (або) використання вимірювальної інформації в автоматизованих системах управління.

Вимірювальні системи можна вважати різновидом вимірювальних інформаційних систем (ВІС), до яких належать також системи автоматичного контролю, системи технічної діагностики і системи розпізнавання образів. ВІС також входять до складу автоматизованих систем управління. Отже, ВІС це сукупність ЗВТ, засобів контролю, діагностики та інших технічних засобів для створення сигналів вимірювальної та інших видів інформації. Незалежно від виду інформації, що формується будь-якою ВІС основним елементом її є ЗВТ.

1.3.1.2. Класифікація вимірювальних приладів

Вимірювальні прилади різноманітні за призначенням, принципом дії, метрологічними та експлуатаційними характеристиками. Тому класифікаційних ознак багато, але доцільно розглянути найзагальніші з них.

За формою вимірювальної інформації, що міститься в інформативному параметрі вихідного сигналу, вимірювальні прилади поділяються на аналогові і цифрові. Аналоговим називається прилад, інформативний параметр вихідного сигналу якого в фізичним аналогом вимірюваної величини (інформативного параметра вхідного сигналу). Наприклад, переміщення рухомої частини електродинамічного вольтметра - аналог середнього квадратного значення вимірюваної напруги.

Цифровим називається прилад, вихідний сигнал якого цифровий, тобто містить інформацію про значення вимірюваної величини, закодовану у цифровому коді. Покази аналогових приладів також цифрові, але їх аналогові вихідні сигнали квантує і кодує в цифровому коді сам спостерігач (експериментатор) в процесі відлічування показів, а в цифровому приладі ці операції виконуються автоматично.

Вимірювальний прилад, що дає можливість тільки відлічувати покази, називається показуючим, а прилад, в якому передбачена автоматична фіксація вимірювальної інформації, - реєструючим. Залежно від виду реєстрації реєструючі прилади поділяються на самописні і

друкуючі. Самописний прилад (самописець) записує вимірювальну інформацію в аналоговій формі у вигляді діаграми, а друкуючий здійснює друкування вимірювальної інформації в цифровій формі.

Залежно від виду значення вимірюваної величини, тобто інформативного параметра вхідного сигналу розрізняють прилади миттєвих або інтегральних (середнє, середнє за модулем, середнє квадратичне) значень, а також інтегруючі та підсумовуючі прилади. Інтегруючий прилад інтегрує вхідний сигнал за часом або іншою незалежною змінною (наприклад, лічильник електричної енергії інтегрує миттєву потужність за часом). Підсумовуючим називається прилад, покази якого функціонально пов'язані з сумою двох або декількох величин, що підводяться до нього по різних каналах (наприклад, ватметр для вимірювання потужності декількох генераторів).

Класифікаційні ознаки - вимірювана величина або її одиниця - відображаються в найменуванні вимірювального приладу, наприклад, вологомір або гігрометр, висотомір або альтиметр, частотомір, але герцметр, амперметр, вольтметр, мілівольтметр і т. п. Електро-вимірювальні прилади, що дозволяють вимірювати дві і більше різних за фізичною природою величин, називають комбінованими приладами (мультиметрами), а прилади, що придатні для вимірювань в колах постійного і змінного струмів, - універсальними приладами.

1.3.1.3. Поняття еталона, зразкових і робочих засобів вимірювань

Результати вимірювань мають виражатися в узаконених одиницях і з потрібною точністю. За рівних інших умов точність вимірювань визначається метрологічними характеристиками використовуваних ЗВ. Тому всі ЗВ підлягають обов'язковій повірці (верифікації, перевірці) або калібруванню. Повірка ЗВ полягає в офіційному ствердженні їх придатності для застосування за призначенням. Висновок робиться на підставі результатів контролю характеристик ЗВ, в основному метрологічних, на відповідність вимогам НТД. Ієрархічно ЗВ поділяються на еталони і робочі ЗВ.

Еталон (еталон одиниці) - ЗВ (або комплекс ЗВ), що забезпечує відтворення і (або) зберігання одиниці з метою передачі її розміру тим ЗВ, що стоять нижче за схемою перевірки, і офіційно затверджений в установленому порядку як еталон (наприклад, комплекс ЗВ для відтворення метра через швидкість поширення світла у вакуумі, затверджений як державний еталон метра).

Робочими називаються ті ЗВ, що використовуються для виконання всіляких вимірювань в державному господарстві, але не служать для перевірки інших ЗВ.

Серед еталонів виділяють робочі, які служать для перевірки інших ЗВ і офіційно затверджені як зразкові. Наприклад, зразкова міра, зразковий вимірювальний перетворювач, зразковий прилад. До зразкових ЗВ належать також зразкові речовини і стандартні зразки.

Зразкова речовина - зразкова міра у вигляді речовини з відомими властивостями, яві відтворюються при додержанні умов приготування, що вказані в затвердженій специфікації. Наприклад, чиста вода, чисті гази (водень, кисень), чисті метали (цинк, срібло, золото та ін.), неметали, сплави.

Стандартний зразок - міра для відтворення одиниць величин, що характеризують властивості або склад речовин і матеріалів (наприклад, стандартний зразок властивостей феромагнітних матеріалів, легованої сталі з атестованим вмістом хімічних елементів).

Робочі еталони атестують і перевіряють з допомогою інших, більш точних ЗВ. Таким способом здійснюється передавання розмірів одиниць ФВ від еталона до робочих ЗВ. Робочі ЗВ не можна застосовувати для перевірки інших ЗВ, якщо вони навіть точніші за наявні робочі еталони, оскільки вони не затверджені офіційно. Разом з тим робочі еталони не дозволяється використовувати як робочі ЗВ для виконання практичних вимірювань.

1.3.2. Структура засобів вимірювань

1.3.2.1. Принцип дії, вимірювальне коло і види схем засобів вимірювань

Кожний ЗВ - це технічний пристрій певної структури, складність якої визначається характером і кількістю проміжних перетворень інформативного параметра вхідного на інформативний параметр вихідного вимірювального сигналу. Всі ці проміжні вимірювальні перетворення здійснюються перетворювальними елементами і базуються на певних фізичних ефектах, які в сукупності погоджені так, щоби забезпечити потрібне функціонування ЗВ, причому один із них домінуючий. Тому принципом дії ЗВ даного виду називають фізичний ефект або принцип, що покладений в основу його побудови. Він часто відображається у назві ЗВ, наприклад, електродинамічний ватметр, термоелектричний термометр.

Перетворювальні елементи ЗВ з'єднані у коло вимірювального перетворення, яке коротко, хоча й не зовсім коректно, називають вимірювальним колом. Справа в тому, що вимірювальним колом може бути тільки таке коло вимірювального перетворення, у якому є операція порівняння вимірювальної інформації. Тому, очевидно, все коло перетворення вимірювального приладу є вимірювальним колом, а кола перетворення вимірювальних перетворювачів, за деякими винятками, не є вимірювальними колами. Кола перетворення на окремих ділянках вимірювальних кіл без операцій порівняння також не є вимірювальними колами.

З точки зору точності важлива роль першого перетворювального елемента у колі перетворення. Та його частина, що перебуває під безпосередньою дією вимірюваної чи перетворюваної величини, називається чутливим елементом або сенсором (наприклад, чутливим елементом терморезистивного термометра є терморезистор).

Кола перетворення зображаються графічно їх схемами - структурними, функціональними і принципальними. Схема кола перетворення є його графічною моделлю, і не можна називати реальне коло схемою.

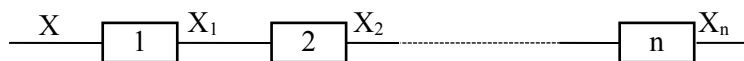
Структурна схема кола перетворення ЗВ відображає (у вигляді відповідно з'єднаних прямокутників) структурні елементи кола, їх функціональне призначення і взаємозв'язки. Ступінь диференціації структурної схеми на структурні елементи залежить від призначення схеми. Прямокутником може бути зображений окремий перетворювальний елемент, з'єднання елементів або й весь ЗВ.

Схема, яка крім структури кола перетворення, пояснює ще функціонування окремих його ділянок, процеси, що в них відбуваються, називається функціональною схемою. Схема, яка відображає повний склад перетворювальних елементів і їх з'єднання, дає уявлення про принцип дії ЗВ, називається принципальною, або повною, схемою кола перетворення ЗВ чи його окремої ділянки.

1.3.2.2. Структурні схеми і види перетворень

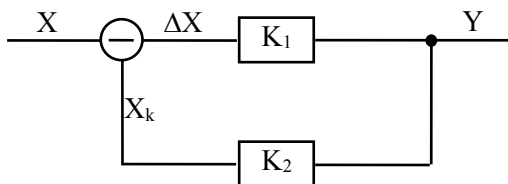
Структурні елементи кола перетворення ЗВ можуть бути з'єднані послідовно, паралельно, зустрічно-паралельно і змішано. Способом з'єднання при відповідному функціональному призначенні структурних елементів визначається метод вимірювального перетворення. Розрізняють методи прямого, зрівноважувального і комбінованого перетворень.

Пряме перетворення характерне тим, що передача вимірювальної інформації відбувається тільки в одному напрямі - від входу до виходу без зворотного зв'язку між ними:



Зрівноважувальне перетворення полягає в тому, що вхідна величина зрівноважується іншою однойменною величиною. Існує два види зрівноважувального перетворення: слідкуюче (від'ємний зворотний зв'язок між виходом і входом) і розгортальне (автономне). Слідкуюче може бути з статичною або з астатичною характеристикою перетворення.

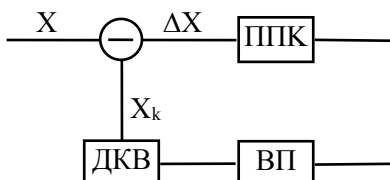
У випадку слідкуючого перетворення вхідна величина X зрівноважується вихідною величиною $X_k = K_2 Y$ кола зворотного перетворення, де K_2 - коефіцієнт перетворення, а Y - вихідна величина всього кола перетворення.



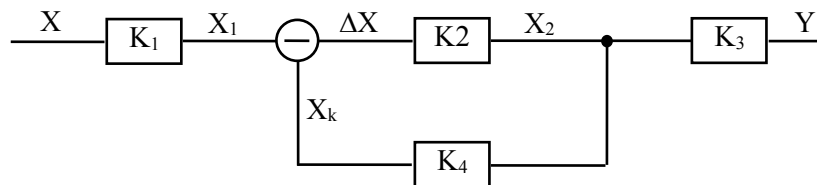
На вхід кола прямого перетворення надходить різниця $\Delta X = X - X_k = X - K_2 Y$, яка завдяки значному коефіцієнту підсилення K_1 прямого кола і глибокому від'ємному зворотному зв'язку стає настільки малою, що можна вважати $X = X_k$ і за відомими значеннями K_2 і Y , а також $X_k = K_2 Y$ визначити значення X .

При статичному слідкуючому зрівноважуванні, в принципі, значення $\Delta X \neq 0$, хоча й мале, бо інакше було б $Y = 0$, а при астатичному - завдяки наявності інтегруючого елемента в колі прямого перетворення може бути $\Delta X = 0$. Функції інтегруючого елемента виконує реверсивний двигун.

У випадку розгортального зрівноважування X_k генерується автономним джерелом компенсуючої величини ДКВ, яка змінюється автоматично до моменту компенсації, тобто коли $\Delta X = X - X_k$ стає настільки малим, що реагує пристрій порівняння ПП, який видає сигнал на вихідний пристрій ВП про рівність $X = X_k$, а ДКВ - інформацію про значення X_k .

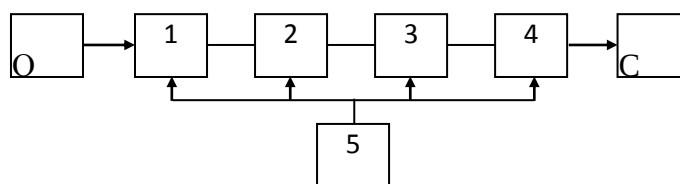


Комбіноване перетворення є тоді, коли від'ємним зворотним зв'язком охоплена тільки частина кола прямого перетворення.



1.3.2.3. Узагальнена структурна схема вимірювальної інформаційної системи

В поняття ВІС входять системи: вимірювальна, автоматичного контролю, технічної діагностики і розпізнавання образів. В поєднанні з комп'ютером ВІС становить вимірювально обчислювальний комплекс. Всі ВІС за структурою можна узагальнити і зобразити, як на рисунку, де позначено: О - об'єкт дослідження; С - споживач вимірювальної інформації; 1 - вимірювальна частина ВІС, до складу якої входять первинні перетворювачі, комутатори, перетворювачі неелектричних величин на електричні, міри і компаратори, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) тощо; 2 - пристрій математичної обробки вимірювальної інформації за певним алгоритмом; 3 - пристрій передачі і зберігання вимірювальної інформації; 4 - пристрій відображення інформації (індикація, друк, перфорація, графіки тощо); 5 - пристрій автоматичного керування роботою ВІС.



Вимірювальна частина ІВС може бути різної структури, а саме:

- паралельної дії - системи з паралельними вимірювальними каналами;
- паралельно-послідовної дії - системи з одним вимірювальним каналом і комутатором для перемикавання первинних перетворювачів;
- послідовної дії - системи з одним вимірювальним каналом і з одним первинним перетворювачем, який сканує досліджуване поле вимірюваної величини в n заданих точках;

- мультиплікуючі розгортальні системи, у яких вимірювальні канали паралельні з окремими компараторами, але зі спільної мірою.