

Міністерство освіти і науки України
Запорізький електротехнічний коледж
Запорізького національного технічного університету

ЗАТВЕРДЖЕНО
Протокол засідання ПЦК 5.05070104
від «___» _____ 2011р. № ____
Голова ПЦК _____ Т.М. Фашевська

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Конспект лекцій

Частина 1

для спеціальностей «Монтаж і експлуатація
електроустаткування підприємств і цивільних споруд»,
«Виробництво електричних машин і апаратів»

Викладач

Т.М. Фашевська

2011

Конспект лекцій з предмету "Теоретичні основи електротехніки" для студентів денної та заочної форми навчання спеціальностей 5.05070104 «Монтаж і експлуатація електроустаткування підприємств і цивільних споруд», 5.05070201 «Виробництво електричних машин і апаратів», розглянуто на засіданні методичної ради коледжу та рекомендовано для використання у навчальному процесі.

Секретар методичної ради

В.В. Кузьменкова

Конспект лекцій з предмету "Теоретичні основи електротехніки" для студентів денної та заочної форми навчання спеціальностей 5.05070104 «Монтаж і експлуатація електроустаткування підприємств і цивільних споруд», 5.05070201 «Виробництво електричних машин і апаратів » оформлено згідно з вимогами стандартів коледжу.

Фахівець зі стандартизації

В.О.Білий

Передмова

Конспект лекцій з "Теоретичних основ електротехніки" призначено для студентів спеціальностей коледжу: «Монтаж і експлуатація електроустаткування підприємств і цивільних споруд», «Виробництво електричних машин і апаратів». В конспекті, який складається з двох частин висвітлюються основні закони електротехніки, поняття про електричні кола та електричні схеми, електричні процеси у колах, методи розрахунку кіл постійного струму, основні характеристики магнітного поля, закони й правила, електромагнітні взаємодії, намагнічування й перемагнічування феромагнітних матеріалів у магнітному полі, поняття про потокозчеплення, індуктивність, взаємоіндуктивність, явища взаємоіндукції та самоіндукції, основні поняття про синусоїдальний струм, та його електричні кола, методи розрахунку кіл з активним опором, індуктивністю та ємністю, явища резонансів напруг і струмів, енергетичні процеси у колах, основні поняття й методи розрахунку трифазних кіл.

Конспект лекцій з "Теоретичних основ електротехніки" складено згідно з діючими робочими навчальними програмами.

Зміст

| | |
|---|----|
| Вступ | 8 |
| 1 Основні поняття про електричне поле | 9 |
| 1.1 Електричне поле та його характеристики | 10 |
| 1.2 Електричне поле як особливий вид матерії. Електрична взаємодія зарядів Закон Кулона | 11 |
| 1.3 Електричне поле декількох зарядів | 12 |
| 1.4 Однорідне електричне поле. Еквіпотенціальні поверхні | 13 |
| 1.5 Потік вектора напруженості | |
| 2 Електричний струм провідності як фізичне явище | 15 |
| 2.1 Провідники, діелектрики. Напівпровідники | 15 |
| 2.2 Провідники в електричному полі | 16 |
| 2.3 Поляризація діелектрика | 17 |
| 2.4 Електричний пробій діелектрика | 18 |
| 3 Електричний струм та опір | 19 |
| 3.1 Електричний струм та його густина | 19 |
| 3.2 Опір та закон Ома. Залежність опору від температури та геометричних розмірів | 20 |
| 3.3 Елементи опору та реостати | 21 |
| 4 Ємність. Конденсатор | 24 |
| 4.1 Сполучення конденсаторів | 24 |
| 4.2 Плоский конденсатор | 26 |
| 4.3 Циліндричний конденсатор | 28 |
| 4.4 Енергія електричного поля конденсатора | 29 |
| 5 Найпростіше електричне коло та його елементи | 30 |
| 5.1 Електричне коло та його елементи. Схема електричного кола | 30 |
| 5.2 Електроенергія. Потужність та ККД | 32 |
| 5.3 Закон Джоуля-Ленца | 33 |
| 6 Режими роботи джерела електричної енергії | 34 |
| 6.1 Узагальнений закон Ома | 34 |
| 6.2 Електричне коло з декількома джерелами ЕРС | 35 |
| 6.3 Баланс потужностей | 36 |
| 6.4 Потенціальна діаграма | 36 |

| | |
|---|----|
| 7 Розрахунок лінійних електричних кіл постійного струму | 39 |
| 7.1 Закони Кірхгофа | 39 |
| 7.2 Застосування законів Кірхгофа | 39 |
| 7.3 Врахування джерел струму | 40 |
| 8 Еквівалентні перетворення в лінійних електричних схемах | 41 |
| 9 Поняття про трикутник та зірку з пасивних елементів кола | 43 |
| 9.1 Перетворення трикутника опорів в еквівалентну зірку та навпаки | 43 |
| 9.2 Сполучення джерел живлення | 44 |
| 9.3 Розрахунок електричних кіл методом перетворення схеми (метод згортання) | 44 |
| 10 Поняття про втрату напруги у проводах ліній електропередач | 46 |
| 10.1 Втрати напруги у проводах ліній електропередач | 46 |
| 10.2 Вибір перерізу проводів за допустимою втратою напруги | 48 |
| 10.3 Вибір раціональних напруг | 50 |
| 11 Нерозгалужене коло із змінним опором | 50 |
| 11.1 Коло зі змінним опором | 50 |
| 11.2 Режим роботи кола | 52 |
| 12 Розрахунок складних електричних кіл постійного струму | 53 |
| 12.1 Розрахунок складних електричних кіл методом накладання(метод суперпозиції полів) | 53 |
| 12.2 Розрахунок складних електричних кіл методом контурних струмів | 56 |
| 12.3 Розрахунок складних електричних кіл методом вузлової напруги | 60 |
| 12.4 Розрахунок складних електричних кіл методом еквівалентного генератора | 63 |
| 12.4.1 Теорема об еквівалентом генераторі | 63 |
| 12.4.2 Метод еквівалентного генератора | 64 |
| 13 Магнітне поле | 66 |
| 13.1 Магнітне поле електричного струму. Правило свердлика | 66 |
| 13.2 Індукція магнітного поля | 68 |
| 13.3 Магнітна проникність | 69 |
| 13.4 Правило лівої руки | 70 |
| 14 Характеристики магнітного поля | 72 |
| 14.1 Магнітний потік | 72 |

| | |
|--|-----|
| 14.2 Вектори намагніченості та напруженості | 73 |
| 14.3 МРС та магнітна напруга. Закон повного струму | 74 |
| 15 Магнітне поле провідника зі струмом та котушки | 75 |
| 15.1 Магнітне поле провідника зі струмом | 75 |
| 15.1 Магнітне поле котушки зі струмом | 77 |
| 16 Електромагнітна індукція | 78 |
| 16.1 Явище електромагнітної індукції | 78 |
| 16.2 ЕРС електромагнітної індукції | 78 |
| 16.3 Правило правої руки | 80 |
| 17 Закон електромагнітної індукції | 81 |
| 17.1 Закон електромагнітної індукції | 81 |
| 17.2 Правило Ленца | 82 |
| 17.3 Види магнітних полів | 83 |
| 18 Феромагнетики | 83 |
| 18.1 Намагнічування феромагнетиків | 83 |
| 18.2 Циклічне перемагнічування | 85 |
| 18.3 Гістерезис. Втрати від гістерезису | 86 |
| 19 Феромагнітні матеріали | 88 |
| 19.1 Класифікація феромагнітних матеріалів | 88 |
| 19.2 Вихрові струми. Втрати в сталі | 89 |
| 20 Магніти | 91 |
| 20.1 Постійні магніти | 91 |
| 20.2 Електромагніти | 93 |
| 21 Магнітні кола | 95 |
| 21.1 Класифікація магнітних кіл | 95 |
| 21.2 Закон Ома для ділянки магнітного кола. Магнітний опір | 96 |
| 21.3 Закони Кірхгофа для магнітного кола | 97 |
| 21.4 Розрахунок нерозгалужених магнітних кіл | 98 |
| 21.5 Розрахунок розгалужених магнітних кіл | 100 |
| 21.5.1 Розгалужене симетричне магнітне коло | 100 |
| 21.5.2 Розгалужене несиметричне магнітне коло | 102 |
| 22 Явище самоіндукції | 105 |
| 22.1 Індуктивність | 105 |
| 22.2 Індуктивність кільцевої та циліндричної котушок | 106 |
| 22.3 Самоіндукція. ЕРС самоіндукції | 107 |
| 22.4 Нелінійна котушка індуктивності | 108 |
| 23 Явище взаємоіндукції | 109 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 109 | 23.1 Енергія магнітного поля | |
| 110 | 23.2 Взаємоіндукція. ЕРС взаємоіндукції | |
| 112 | 23.3 Принцип дії трансформатора | |
| 113 | 24 Принцип дії електричних машин | |
| | 24.1 Перетворення механічної енергії в електричну.(принцип дії генератора) | 113 |
| | 24.2 Перетворення електричної енергії в механічну (принцип дії двигуна) | 115 |
| 117 | Список літератури | |

Вступ

Метою предмету є вивчення основних елементів кіл, фізичної сутності електричних та магнітних явищ, які спостерігаються в електротехнічних пристроях. Вивчення предмету ґрунтується на навчальному матеріалі, насамперед, математики та фізики, та стає теоретичною базою для вивчення предметів за фахом: електричні машини, основи електроприводу, електропостачання підприємств та цивільних споруд.

Задачі предмета: вивчити основні закони електротехніки, поняття про електричні схеми, електричні процеси у колах, методи розрахунку кіл постійного струму, основні характеристики магнітного поля, електромагнітні взаємодії, намагнічування й перемагнічування феромагнітних матеріалів у магнітному полі, поняття про потокозчеплення, індуктивність, взаємоіндуктивність, явища взаємоіндукції та самоіндукції, основні поняття про синусоїдальний струм, та його електричні кола, методи розрахунку кіл з активним опором, індуктивністю та ємністю, явища резонансів напруг і струмів, енергетичні процеси у колах, основні поняття й методи розрахунку трифазних кіл.

На рисунку 1.1 представлена блок-схема взаємодії предмета з іншими предметами.

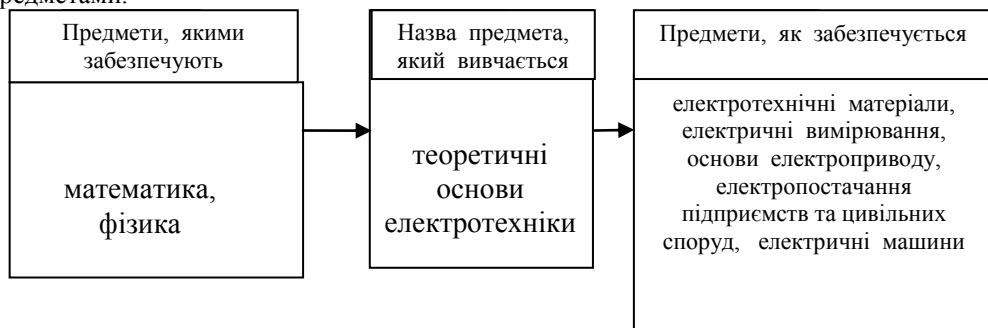


Рисунок 1.1 - Блок-схема взаємодії предмета з іншими предметами

Електротехніка - це наука о застосуванні електричної енергії у практичних цілях. Електротехніка розглядає питання виробництва електроенергії, її розподілення та перетворення у інші види енергії. Електроенергія володіє цінними властивостями: вона дуже просто перетворюється з інших видів енергії, передається на великі відстані з малими втратами, у пункті споживання вона розподіляється та перетворюється у потрібний вид енергії.

Споживачами електроенергії є електродвигуни, електропечі, електролізні, термічні, зварювальні устаткування, освітлювальні та побутові прибори тощо.

1 Основні поняття про електричне поле

Ще давні греки знали, що янтар потертий об хутро отримує здатність притягувати до себе пух, волосся та інші легкі тіла, але зовсім не знали у чому суттєвість цього явища та чим воно може бути корисним для людства. Грецький філософ Фалес Мілетський у VI столітті до нашої ери описав це явище, яке більш ніж 2000 років залишалось не вивченим. У XVI столітті англійський вчений Гілберт повторив досліди, описані Фалесом Мілетським. На базі дослідів він встановив, що крім янтарю, властивість притягувати легкі тіла отримують при терті алмаз, гірський криштал, сірка, смола... Тіла, які володіють подібними властивостями почали називати наелектризованими.

Слово «електрика» походить від слова «електрон», що грецькою мовою означає янтар. А явище виникнення цих властивостей у тіл було названо електризацією. Доказ електризації металів тертям уперше було дано руським фізиком В.В.Петровим. Виявилось, що наелектризувати тертям можна всяке тіло не залежно від того в якому воно стані: твердому, рідкому чи газоподібному.

Дюфе у 1733 році виявив, що тіла електризуються різнорідними електриками: перший рід з'являється на склі, дорогоцінних каменях, хутрі, другий - на янтарі, смолі, шовку. Пізніше електрику, яка з'являється на склі, назвали позитивною, а на янтарю - негативною.

Таким чином, всяке тіло вміщує у себе багату кількість елементарних часток речовини, які мають електричний заряд: позитивний (протони) чи негативний (електрони). Коли тіло має однакову кількість протонів й електронів, то кажуть, що воно електрично нейтральне. В електрично зарядженому тілі переважають ті чи інші заряди, й тоді кажуть, що тіло позитивно чи негативно заряджене.

Заряди (чи електрично заряджені тіла) взаємодіють між собою на відстані: різнойменні заряджені частки притягуються один до одного ("+" та "-"), однойменні заряджені частки відштовхуються один від одного ("- та -" чи "+" та "+"). Цю властивість зарядів назвали законом взаємодії зарядів.

Таким чином, заряд - це властивість та міра наелектризованості тіла. Електричний заряд позначають - q , Кл (кулон). Електричний заряд електрона: $q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Тобто, при числі електронів $6,3 \times 10^{18}$ $q = 1$ Кл та його називають одиничним зарядом. Заряд розміщується тільки на поверхні.

Електричне поле - це матеріальне середовище, яке оточує заряди, в якому заряди взаємодіють між собою і яке неможливо відчути органами почуття.

Кожний заряд пов'язаний з оточуючим його електричним полем. Електричне поле чинить силову дію на внесені в нього електрично заряджені тіла. Тобто електричне поле виконує роботу по відношенню до внесеного тіла, та володіє енергією, яку називають електричною.

Електрична енергія - це властивість електричного поля виконувати роботу по відношенню до внесеного в нього електрично зарядженого тіла чи часток. Позначається - W , Дж.

1.1 ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Кожна точка електричного поля характеризується напруженістю поля, яка позначається - E , В/м (вольт/метр). Напруженість поля числено дорівнює силі поля, яка діє на одиничний заряд:

$$E = \frac{F}{q},$$

де F - сила поля, яка діє на одиничний заряд, H

Крім числового значення напруженість характеризується напрямом, який збігається з напрямом сили поля, діючи на позитивний заряд у цій точці. Таким чином, напруженість поля - векторна величина.

Електричне поле графічно зображується лініями напруженості, які починаються на позитивному заряді, а закінчуються на негативному, тобто є незамкненими. Лінії проводяться так, щоб у кожній її точці вектор напруженості був направлений уздовж дотичної до неї у цій точці.

При переміщенні заряду в однорідному полі силами поля виконується робота, яка числено дорівнює добутку сили електричного поля, яка діє на заряд, на відстань, на яку перемістився заряд під дією електричного поля. Позначається - A . Вимірюється у Дж.

$$A = F \times l,$$

де l - відстань, на яку перемістився заряд під дією електричного поля, m

Електрична напруга між двома точками електричного поля (далі напруга) - це величина, яка визначається відношенням роботи по переміщенню заряду між цими двома точками поля, до заряду. Позначається - U . Вимірюється - В.

$$U = \frac{A}{q} \quad \text{або} \quad U = \frac{F \times l}{q} = \frac{E \times q \times l}{q} = E \times l$$

Потенціал точки - це напруга між даною точкою та точкою нульового потенціалу. Потенціал нульової точки умовно приймається рівним нулю.

Потенціал позначається - φ , В

Електрична напруга між двома точками електричного поля дорівнює різниці потенціалів цих точок:

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

1.2 Електричне поле як особливий вид матерії

Електрична взаємодія зарядів. Закон Кулона

У 1785 році французький вчений Кулон встановив кількісну залежність між силою взаємодії двох електричних зарядів, їх величиною та відстанню між ними. Для дослідження взаємодії зарядів Кулон використав крутильні ваги, які складаються з непровідного електричний заряд стрижня, підваженого на тонкій кварцовій нитці, у скляному циліндричному посуді. На одному кінці стрижня був закріплений металевий шар, на іншому - противаг. На скляному посуді була нанесена шкала, яка дозволяла вимірювати кут закручування нитки. Через отвір у кришці посуду ввели другий аналогічний за розмірами нерухомий металевий шар. На шкалі відмічають місце розташування рухомого шару. Потім шари заряджають й спостерігають кут закручування нитки. Змінюючи відстань між шарами й вимірюючи кут закручування було знайдено залежність сили взаємодії зарядів на відстані.

Величину заряду при постійній відстані між шарами змінювали таким чином: незаряджений шар аналогічний шарам у посуді присували до одного із заряджених шарів, при цьому половина заряду з останнього стікала до незарядженого шару. Таким чином була встановлена залежність між силою взаємодії та величиною зарядів, які знаходяться у повітрі.

На базі зроблених вимірювань Кулон вивів наступне:

Сила взаємодії двох точкових електричних зарядів прямо пропорційна добутку цих зарядів, та обернено пропорційна квадрату відстані між ними та направлена уздовж прямої, яка з'єднує ці заряди. Математично цей закон можна виразити

такою формулою:

$$F = \frac{q_1 \times q_2}{4\pi\epsilon_a R^2},$$

де q_1, q_2 - величини зарядів, Кл

R - відстань між зарядами, м

ϵ_a - абсолютна діелектрична проникність середовища, Ф/м

Досліди показали, що величина сили взаємодії наелектризованих тіл також залежить від ізолюючого середовища, в якому вони знаходяться. Наприклад, сила взаємодії у керосині при усіх рівних умовах менше, ніж у вакуумі, у два рази, а в воді - у 81 раз.

Величина, яка дозволяє врахувати вплив ізолюючого середовища на силу взаємодії наелектризованих тіл, називається абсолютною діелектричною проникністю середовища. Позначається ϵ_a . Чим більше ця проникність, тим менше сила взаємодії зарядів. Абсолютну діелектричну проникність середовища можна представити як добуток двох величин: $\epsilon_a = \epsilon \times \epsilon_0$,

де ϵ - це діелектрична проникність (чи відносна діелектрична проникність), величина безмірна, залежить лише від властивостей середовища й не залежить від вибору одиниць вимірювання, вона показує у скільки раз сила взаємодії

між електричними зарядами у даному середовищі менше, ніж у вакуумі. Для вакууму $\epsilon = 1$, для кerosину - 2, скла - $6 \div 8$, води - 81, повітря - 1, папір - 4. ϵ_0 - це електрична постійна, або стала величина, вона є розмірною, та залежить лише від вибору одиниць вимірювання та не залежить від властивостей середовища. У системі СІ має значення: $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$

Сили взаємодії нерухомих електричних зарядів називають електростатичними. Електричне поле нерухомих зарядів називають електростатичним.

Коли в електричне поле заряду q_1 внести заряд q_2 , то буде виникати Кулонівська сила. Тобто поле виконує роботу, та при цьому виділяється енергія. Відношення цієї електроенергії до величини заряду поля називається потенціалом:

$$\varphi = \frac{W}{q_1} = E \times R = \frac{F}{q_2} \times R = \frac{q_1 \times q_2}{q_2 \times 4\pi \times \epsilon_0 \times \epsilon \times R^2} \times R = \frac{q_1}{4\pi \times \epsilon_0 \times \epsilon \times R}$$

При нескінченній відстані $\varphi = \infty$ потенціал дорівнює нулю, тобто потенціал нескінченно віддаленої точки дорівнює нулю.

1.3 Електричне поле декількох зарядів

Коли електричне поле створюється не одним, а декількома точковими зарядами, то має місце принцип накладання (метод суперпозиції полів). Тобто сила, з якою два заряду діють на третій заряд дорівнює геометричній сумі двох сил:

силі, з якою перший заряд діє на третій при відсутності другого заряду:

$$F_1 = \frac{q_1 \times q_3}{4\pi \times \epsilon_0 \times \epsilon \times R_1^2}$$

силі, з якою другий заряд діє на третій при відсутності першого заряду:

$$F_2 = \frac{q_2 \times q_3}{4\pi \times \epsilon_0 \times \epsilon \times R_2^2}$$

де R_1 - відстань між першим та третім зарядами, м

R_2 - відстань між другим та третім зарядами, м

Вектори напруженості поля першого та другого зарядів:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \frac{F_1}{q_3} + \frac{F_2}{q_3}$$

Зарядженні тіла, розміри яких малі в порівнянні з відстанню між ними, називаються точковими зарядами. Два точкових електричних заряду, рівні за величиною й протилежні за напрямком, і які знаходяться один від одного на дуже малій відстані при зрівнянні з відстанню від них до точок спостереження (чи іншого заряду), утворюють електричний диполь. Електричний момент диполя - це векторна величина, яка дорівнює добутку абсолютного значення одного з даних зарядів і відстані між ними й направлена від негативного до позитивного заряду. Позначається - p , Кл \times м:

$$p = q \times l$$

1.4 Однорідне електричне поле. Еквіпотенціальні поверхні

Якщо взяти дві рівні та паралельно розташовані металеві пластини з однаковими, але протилежними за знаком зарядами, то вони утворюють простіший вигляд електричного поля, яке назвали однорідним. В однорідному полі силові лінії паралельні між собою та перпендикулярні до пластин, а щільність ліній всюди однакова. Лише на краях пластин лінії скривлені й мають іншу щільність. Ми будемо називати поле однорідним, якщо у всіх точках його вектори напруженості однакові за величиною та напрямком.

Чим густіше розміщені силові лінії однорідного поля, тим більше напруженість у кожній його точці.

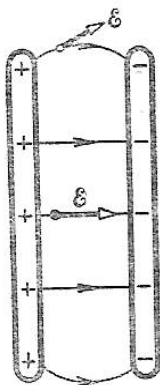


Рисунок 1.2-Електричне поле, між двома зарядженими плоскими пластинами

Площина, усі точки якої мають однаковий потенціал, називається рівнопотенціальною чи еквіпотенціальною. Вектор напруженості (а також силові лінії) завжди перпендикулярні до еквіпотенціальної площини. Еквіпотенціальні поверхні повторюють конфігурацію тіла. Еквіпотенціальні поверхні проводяться так, щоб напруга між всякими суміжними поверхнями була однакова. При збільшенні відстані від центру

шару та при зменшенні напруженості поля щільність електричних ліній зменшується обернено пропорційно квадрату відстані (тобто E зменшується обернено пропорційно квадрату відстані). Разом з цим зростають відстані між сусідніми еквіпотенціальними поверхнями, так як у більш слабкому полі потребується більша відстань для зміни потенціалу на одну і ту ж величину.

1.5 Потік вектора напруженості

Загальну кількість силових ліній (тобто щільність поля, або густину), які пронизують площину S , визначає потік вектора напруженості електричного поля.

Добуток напруженості електричного поля й площі, яка перпендикулярна до напрямку електричних ліній (силових ліній напруженості), називається потоком вектора напруженості поля крізь цю площу. Позначається - N , $\mathbf{E} \times \mathbf{S}$.

$$N = E \times S$$

де E - напруженості електричного поля, В/м

S - площа, яка перпендикулярна до напрямку електричних ліній, м^2

Коли вектор напруженості не перпендикулярний площі, визначають нормаль (тобто перпендикулярну) складову вектора напруженості - E_H , і тоді:

$$N = E_H \times S$$

Теорема Остроградського і Гауса встановлює лінійну залежність між потоком вектора напруженості поля крізь замкнену поверхню та величиною заряду всередині цієї поверхні: потік вектора напруженості електричного поля крізь замкнену поверхню дорівнює відношенню алгебраїчної суми зарядів, замкнених всередині цієї поверхні, до абсолютної діелектричної проникності:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\epsilon_a},$$

де n - кількість зарядів, замкнутих всередині поверхні.

2 Електричний струм провідності як фізичне явище

2.1 Провідники, діелектрики, напівпровідники

Всі речовини складаються з атомів й молекул, які мають позитивно заряджені ядра та негативно заряджені електрони. Атоми й молекули електрично нейтральні, так як заряд ядра дорівнює сумарному заряду електронів, які оточують ядро. При наявності зовнішніх факторів (збільшення температури, електричне поле тощо) атом чи молекула втрачає електрон. Цей атом перетворюється у позитивний іон, а електрон, який відірвався від атому,

може приєднатися до іншого атому, перетворивши його на негативний іон, чи залишитися вільним. Процес утворення іонів називають іонізацією. Кількість вільних електронів чи іонів в одиниці об'єму речовини називається концентрацією заряджених часток. Таким чином, в речовині, яку помістили у електричне поле, під дією сил поля виникає процес руху вільних електронів чи іонів у напрямку сил поля, який назвали електричним струмом.

Властивість речовини проводити струм під дією електричного поля називається електропровідністю речовини, яка залежить від концентрації вільних електрично заряджених часток. Чим більше концентрація заряджених часток, тим більше електропровідність речовини. Всі речовини в залежності від електропровідності діляться на:

1 Провідники. Володіють дуже великою електропровідністю. Провідники діляться на дві групи. До провідників першої групи відносяться метали (мідь, алюміній, срібло тощо) та їх сплави, в яких можливо переміщення тільки електронів. Тобто в металах електрони дуже слабо зв'язані з ядрами атомів й легко від них відділяються. В металах явище електричного струму пов'язано з рухом вільних електронів, які володіють дуже великою рухомістю та знаходяться в стані теплового руху. Цю електропровідність називають електронною. Провідники використовуються для виготовлення проводів, ЛЕП, обмоток електричних машин тощо. До провідників другої групи відносяться водні розчини солей, кислот тощо, які називають електролітами. Під дією розчину молекули речовини розпадаються на позитивні та негативні іони, які під дією електричного поля почнуть переміщатися. Іони електроліту при проходженні струму почнуть осаджуватися на електродах, опущених в електроліт. Процес виділення речовини з електролітів електричним струмом називається електролізом. Його використовують для добути кольорових металів з розчинів їх з'єднань (мідь, алюміній), а також для покриття металів захисним шаром іншого металу (наприклад, хромування).

2 Діелектрики (чи електроізоляційні речовини). Речовини з дуже малою електропровідністю (гази, гумові речовини, мінеральні олії тощо). В цих речовинах електрони дуже сильно пов'язані з ядрами атомів і під дією електричного поля рідко відділяються від ядер. Тобто діелектрики не проводять електричний струм. Цю їхню властивість використовують при виробництві електрозахисних засобів: діелектричні рукавички, взуття, коврики, ізолюючи підставки, накладки, ковпаки, ізолятори на електрообладнанні тощо. Діелектрики можуть бути: тверді, газоподібні, рідині.

3 Напівпровідники (германій, селен, кремній). Це речовини, які окрім електронної провідності, мають «діркову» провідність, яка в великій ступені залежить від наявності зовнішніх факторів: світла, температури, електричного чи магнітного поля. Ці речовини мають ковалентний зв'язок (- це хімічний зв'язок між двома електронами сусідніх атомів на одній орбіті). Ковалентний зв'язок дуже неміцний. При наявності зовнішнього фактора він руйнується і з'являються вільні електрони (електронна провідність). У момент утворення вільного електрону у ковалентному зв'язку з'являється вільне місто -

«електрона дірка»(еквівалентна протону), яка притягує до себе електрон з сусіднього ковалентного зв'язку. Але тоді утворюється нова «дірка», яка знову притягує до себе електрон з сусіднього ковалентного зв'язку й так далі. Тобто під дією електричного поля переміщуються «дірки» у напрямку поля (назустріч електронам) - рух протонів. Таким чином, при електронній провідності - електрон проходить увесь шлях, а при «дірковій» - електрони по чергову замінюються у зв'язках, кожний електрон проходить частку шляху. При порушенні зв'язків у напівпровідниках одночасно виникає однакова кількість електронів та «дірок». Тобто, провідність складається з електронної та «діркової» й називається власною провідністю напівпровідника. Властивості напівпровідників можливо змінити, якщо до них внести домішки інших речовин. Тим самим збільшити ту чи іншу провідність. Це використовується у промисловій електроніці: діоди, транзистори, тиристори. Використовують, як підсилювачі, випрямлячі, електронні генератори, стабілізатори тощо. Їх переваги: мала втрата енергії, вартість, розмір та маса, простота експлуатації, великий строк роботи. Недолік: залежність провідності від температури.

2.2 Провідники в електричному полі

Коли провідник помістити у електричне поле, то під дією поля вільні електрони провідника почнуть переміщатись у напрямку, протилежному напрямку силових ліній поля. При цьому на одній поверхні провідника виникає надмірний негативний заряд, а на іншій - надмірний позитивний. Тобто, всередині провідника виникає додаткове електричне поле, напруженість якого направлена назустріч напруженості зовнішнього поля. Тоді, напруженість й дія зовнішнього поля на вільні електрони буде слабнути. Це буде відбуватися доки напруженість результуючого поля всередині провідника не стане рівною нулю:

$$E_{\text{РЕЗУЛЬТ}} = E_{\text{ЗОВН}} - E_{\text{ВНУТР}} = 0$$

Тоді, розподілення зарядів закінчиться і електрони стануть нерухомими.

Таким чином, електричне поле всередині провідника відсутнє й всякий провідник, який знаходиться біля наелектризованого тіла, електризується. Це явище називається електростатичною індукцією чи електризацією. Слово індукція йде від латинського слова «індуко» - навожу. Явище електричної індукції було вивчено у 18 столітті руським вченим Ф.У. Епінусом.

Тобто, електростатична індукція - це явище розділення електричних зарядів провідника під дією зовнішнього електричного поля. При віддаленні цього поля електрони розподіляються по всьому провіднику й нейтральний стан провідника відновлюється. Електричні заряди розміщуються лише на зовнішній поверхні плоского чи випуклого провідника, але вони не розміщуються ні всередині тіла ні на вигнутих поверхнях. Тобто, електричне поле відсутнє всередині пустого зарядженого провідника. Це явище пояснюється тим, що по закону взаємодії однаково заряджених зарядів відбувається переміщення зарядів доки напруженості не зрівняються, але зовнішня поверхня завжди далі від внутрішньої, тому заряди розміщуються на зовнішній поверхні. При чому, чим більше кривизна поверхні, тим щільніше розміщуються заряди.

Це явище використовують у вигляді металевих сіток для екранування (захисту від зовнішніх електростатичних полей обладнання та людини при виконанні робіт у зоні впливу електричного поля). При напруженості електричного поля до 5 кВ/м тривалість присутності людини у зоні його впливу не обмежується, при напруженості $20 \div 25 \text{ кВ/м}$ - не більше 10 хвилин, при напруженості вище 25 кВ/м - треба використовувати екранування.

2.3 Поляризація діелектрика

Якщо діелектрик помістити у електричне поле, то під дією сил поля електрони на орбітах зміщуються назустріч поля (тобто відносно один одного, так як вільних електронів діелектрик не має). Тобто кожна раніше нейтральна молекула чи атом стають диполями з рівними зарядами ядра та електронів на орбітах. У деяких діелектриках та при відсутності електричного поля є диполі, але вони розташовані хаотично. А коли діелектрик знаходиться у електричному полі, то диполі розташовуються так що їх позитивні заряди знаходяться у напрямку силових ліній поля, а негативні - у протилежному напрямку. Такий діелектрик називається поляризованим, а явище - поляризацією діелектрика. Явище поляризації діелектриків було вивчено у 18 столітті руським вченим Ф.У. Епінусом. Виникає внутрішнє поле, напруженість якого направлена назустріч напруженості зовнішнього поля, та результуюча напруженість зменшується. Диполі з'являються на межі діелектрика та провідника, нейтралізують частку зарядів провіднику, тому сила взаємодії зарядів у провіднику зменшиться, та напруженість у кожній точці провіднику теж зменшиться, а діелектрична проникність за законом Кулона такого діелектрика збільшиться. При внесенні діелектрика у електричне поле ЕРС цього поля зменшується на величину, яка дорівнює діелектричній проникності діелектрику, тобто у ϵ раз. Коли діелектрик знаходиться у змінному електричному полі, то зміщення електронів теж змінне. Це приводить до збільшення рухомості часток, а тобто до нагріву діелектрика згідно закону Джоуля - Ленца. Чим частіше змінюється поле, тим сильніше нагрівається діелектрик.

2.4 Електричний пробій діелектрика

В нормальних умовах діелектрик володіє малою провідністю. Ця його властивість зберігається доки напруженість зовнішнього електричного поля, в якому він знаходиться, не збільшиться до деякого значення, при якому починається іонізація молекул діелектрика (розчеплення молекул на іони). При цьому зв'язок між електронами й протонами розривається й з'являються вільні електрони. В такому стані діелектрик переходить в стан провідника, та утворюється утвір для проходження електричного струму, тобто діелектрик починає проводити струм. Це значення напруженості для кожного діелектрика різне.

Напруженість електричного поля, при якому у діелектрика починається іонізація молекул, називається пробивною напруженістю (чи електричною міцністю) діелектрика. Величина напруженості електричного поля, яка допускається в діелектрику при його використанні у електричних устаткуваннях, називається допустимою напруженістю діелектрика. Ця величина менше за електричну міцність діелектрика. Відношення пробивної напруженості до допустимої визначає запас міцності діелектрика.

У газів та рідких діелектриків ізолюючі властивості відновлюються при зниженні прикладеної напруженості поля до величини меншої за пробивну напруженість, а у твердих діелектриків не відновлюється.

Значення пробивної напруженості для деяких діелектриків: скло - 40 кВ/мм , фарфор - $7,5 \text{ кВ/мм}$, повітря - 3 кВ/мм .

З точки зору міцності діелектриків кращими діелектриками є вакуум й гази, особливо при високому тиску.

3 Електричний струм та опір

3.1 Електричний струм та його густина

Електричний струм - це спрямований рух заряджених часток під дією електричного поля в провіднику. Позначається - I , А(ампер).

Сила струму - це кількість зарядів, які пройшли скрізь поперечну площину

провідника в одиницю часу:

$$I = \frac{q}{t}$$

де t - час, с

Постійний струм - це струм, який не змінюється ні за значенням ні за напрямком з часом. За додатній напрямок струму приймають напрямок переміщення протонів, тобто назустріч електронам - від "+" до "-".

Густина струму - це величина, яка чисельно дорівнює відношенню сили струму до площини поперечного перерізу проводу, по якому проходить цей струм. Позначається - J , $\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$.

$$J = \frac{I}{S},$$

де S - площа поперечного перерізу проводу мм^2

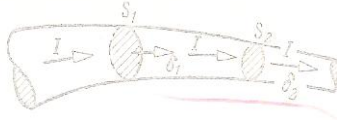


Рисунок 3.1- Електричний струм в різних перетинах проводу

Таким чином, густина струму визначається зарядом, який проходить через одиницю поперечного перерізу проводу в одиницю часу. Заряд пропорційний швидкості руху заряджених часток, а швидкість руху пропорційна напруженості електричного поля: $J = \gamma \times E$,

де γ - коефіцієнт пропорційності, який називають питомою електропровідністю провідника. При постійній температурі питома електропровідність провідника теж постійна. При збільшенні температури у провідників першого класу електропровідність зменшується, а у провідників другого класу збільшується.

Електропровідність провідника позначається - G . Вимірюється у См.

$$G = \frac{\gamma \times S}{l},$$

де l - довжина провідника, м

Тобто, електропровідність провідника залежить від довжини та поперечного перерізу проводу, та при постійній температурі електропровідність даного проводу постійна. Густина струму - векторна величина, яка направлена за нормаллю до площини поперечного перерізу проводу. Густина струму при різних площинах поперечного перерізу провідника різна: чим більше переріз, тим менше густина струму, та навпаки.

3.2 Опір та закон Ома. Залежність опору від температури та геометричних розмірів

При переміщенні електронів (електричного струму) серед атомів та іонів матеріалу, які не мають поступального руху, а знаходяться у коливальному стані, виникає зіткнення цих часток між собою. Наразі взаємодії електронів з атомами та іншими електронами виникають сили, які діють на електрони в різних напрямках. Це приводить до часткової хаотичності у руху електронів і викликає зменшення сили струму. Тобто всі елементи електричного кола чинять протидію, або опираються проходженню через них струму, та зменшують цей струм. Це явище характеризує величина, яка обернена провідності, яку назвали опором. Таким чином, опір - це властивість провідника протидіяти проходженню через нього струму. Позначається - R . Вимірюється в Ом.

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

Позначення опору в електричних схемах вказане на рис. 3.2:

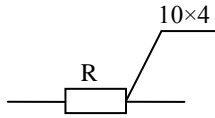


Рисунок 3.2 - Позначення опору в електричних схемах

Зв'язок між струмом у проводі та напругою на кінцях цього проводу встановлює закон Ома (названий в ім'я німецького фізика Ома, який відкрив дослідним шляхом у 1827 році цей закон): струм на ділянці електричного кола прямо пропорційний напрузі на затискачах цієї ділянки та обернено

пропорційний його опору:

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

Величина опору визначається електропровідністю матеріалу із якого виготовлений провід та геометричними розмірами проводу:

$$R = \rho \times \frac{l}{S}, \text{ Ом}$$

Як видно з формули, чим більше довжина проводу, тим більше його опір, чим більше переріз проводу, тим менше його опір. Величина, зворотна питомій провідності, називається питомим опором. Позначається -

$$\rho, \text{ Ом} \times \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}.$$

$$\rho = \frac{1}{\gamma},$$

де γ - питома електропровідність матеріалу проводу, $\frac{\text{м}}{\text{Ом} \times \text{мм}^2}$

Питомий опір - це постійна величина матеріалу із якого зроблено провід. Порівняно малим питомим опором володіють провідники, із яких виготовляються ЛЕП, кабелі, обмотки електричних машин, трансформаторів:

$$\rho_{Al} = 0,029 \text{ Ом} \times \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}, \quad \rho_{Cu} = 0,0175 \text{ Ом} \times \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Для виготовлення обмоток нагрівачів пристроїв та реостатів використовують сплави з великим питомим

$$\text{опором: } \rho_{\text{фехраль}} = 1,4 \text{ Ом} \times \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}, \quad \rho_{\text{ніхром}} = 1,1 \text{ Ом} \times \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Опір діелектриків дуже великий при порівнянні з опором провідників.

Питомий опір матеріалу залежить від температури навколишнього середовища: зі збільшенням температури рухомість вільних електронів зменшується, що приводить до збільшення питомого опору у провідниках 1-го класу:

$$\rho = \rho_0 \times (1 + \alpha \times t)$$

де ρ_0 - питомий опір при температурі 0°C чи 273K - первісний опір,

t - температура навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$,

α - температурний коефіцієнт опору, $1/\text{K}$

Температурним коефіцієнтом опору називається величина, яка показує на яку частину змінюється опір провідника при нагріві на 1K чи на 1°C . Деякі сплави мають дуже мале зміння опору при зміні температури. Наприклад, нікелін, манганін. Проволока з таких металів використовується у приладах, які потребують постійного опору: у еталонах опору, реостатах. Коли провідник нагрівається не від 0°C , а від температури t_1 до температури t_2 , то його опір змінюється від R_1 до R_2 , а температурний коефіцієнт залишається майже незмінним у межах від 0 до 100°C . Тоді можна вважати:

$$R_2 = R_1 \times (1 + \alpha \times t_2 - t_1) \quad \text{або} \quad \frac{\Delta R}{R} = \alpha \times \Delta t \times 100\%$$

3.3 Елементи опорів та реостати

Існує два терміну «опір»: перший - це коли опір розуміють, як властивість провідника протистояти проходженню через нього струму, та другий - це коли опір розуміють, як пристрій, призначений для вмикання у електричне коло з метою регулювання, зменшення чи обмеження струму у цьому колі. До таких



Рисунок 3.3 – Резистор типу BC

пристроїв, наприклад, відносяться реостати.

Реостати - це пристрої, які дозволяють змінювати опір кола й тим самим змінювати силу струму. Реостат був винайдено у 1841 році руським вченим Б.С.Якобі. Існують різні типи реостатів. Дротові реостати виготовляють зі спеціальних сплавів: константану, манганіну, нікеліну, ніхрому, так як ці сплави мають великі питомі опори та мали температурні коефіцієнти, тому реостати з цих сплавів невеликі за розміром й витримують значний нагрів без помітної зміни опору. Також ці матеріали не піддаються корозії при нагріві, коли елементи призначені для роботи на повітрі. Найчастіше використовуються

важільні, з ковзким контактом та штепсельні. Важільний реостат має важіль, який переміщується з одного елементу опору на інший при певних умовах, він дає стрибкоподібну зміну опору. Реостат з ковзким контактом складається з ізолятору, на який намотано дріт. По дроту переміщають повільно металевий повзунок, який вмикає виток за витком. Штепсельний реостат складається з ряду котушок, які вмонтовані у ящик. Зверху на кришці ящика є товсті мідні смуги, розділені проміжками, в які вставляються штепсели. У тім місці, де ввімкнено штепсель, струм піде по пластині через штепсель, мінуючи інші котушки опору. На кришці ящика наносять величини опорів котушок штепсельного реостату.

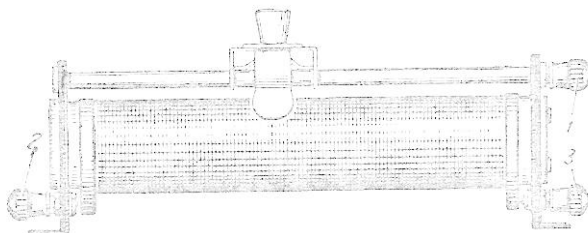


Рисунок 3.4-Реостат

В залежності від призначення опори ділять на наступні групи: пускові, гальмові, регульовальні, добавочні, економічні, розрядні, баластні, навантажувальні, нагрівальні, заземлювальні, встановлювальні. Основним конструктивним вузлом таких опорів є елемент опору. Для можливості змінення величини опору, окремі елементи з'єднуються між собою за певними схемам. Величина опору змінюється за допомогою перемикаючого пристрою, наприклад контролера. В залежності від матеріалу провідника розрізняють металеві, рідинні, вугільні та керамічні опори. У електроприводі використовують металеві опори. Керамічні опори використовують у високовольтних апаратах, наприклад, розрядниках. Опори виготовляють з спеціальних сплавів: сталь, електротехнічний чавун, константан, ніхром, фехраль. Ці сплави мають великі питомі опори та мали температурні коефіцієнти. Робоча температура матеріалу повинна бути як можна більше, що дозволяє скоротити масу матеріалу та поверхню охолодження. Існують такі конструкції елементів опорів:

У вигляді вільної спіралі з дроту чи стрічки на циліндричній оправі «виток до витку». Для збільшення жорсткості спіралі дріт може намотуватися на фарфоровий чи керамічний каркас у вигляді трубки. В цьому випадку у процесі нагріву бере участь не лише дріт, а й сам каркас. Для захисту від механічних пошкоджень зверху проводу наносять склоемаль. Використовують при малих потужностях двигунів, у зв'язку з великими розмірами каркасу.

Рамочні елементи (дротові чи стрічкові поля) використовують на двигунах з великими потужностями. На сталеву пластину прикріплюють ізолятор з фарфору чи стеатиту. Дріт з константану намотують у канавки, розміщені на поверхні ізоляторів. Елементи опору komponуються у ящик. Для великих струмів використовують стрічку. З точки зору охолодження цей елемент гірше за вільну спіраль. Але маса ізоляторів невелика.

Фехралеві елементи використовують на двигунах з великими потужностями та напругами. Так же як і у попередній конструкції є ізолятор з канавками, в які намотується стрічка. Лише стрічка фехралева. Елементи опору komponуються у ящик по п'ять штук. Потужність кожного елемента 450 Вт. При великих струмах елементи з'єднуються паралельно. Відпайки опорів приварюються до спіралі й при монтажі не можуть перевстановлюватись.

Чавунні елементи використовують як пускові на двигунах з великими потужностями та напругами, так як опір цих елементів сильно залежить від температури. Елементи мають форму зигзагу. Для з'єднання друг з другом на кінцях елементів є вушки з отворами для кріплення. Елементи опору з'єднуються послідовно у ящик за допомогою сталевих стрижнів. Загальна потужність ящика не повинна перевищувати 4,5 кВт. У зв'язку з малою механічною міцністю в установках, в яких можлива вібрація чи удари, ці елементи не використовують.

4 Ємність. Конденсатор

4.1 Сполучення конденсаторів

Конденсатор - це елемент, який складається з двох металевих пластин чи провідників всякої форми, розділених діелектриком. На обкладках (різних пластинах) конденсатора, приєднаних до затискачів джерела живлення, накопичуються рівні за величиною, але протилежні за знаком заряди.

Величина цих зарядів пропорційна прикладеній напрузі. Властивість конденсаторів накопичувати й утримувати електричні заряди характеризуються

ємністю конденсатора.

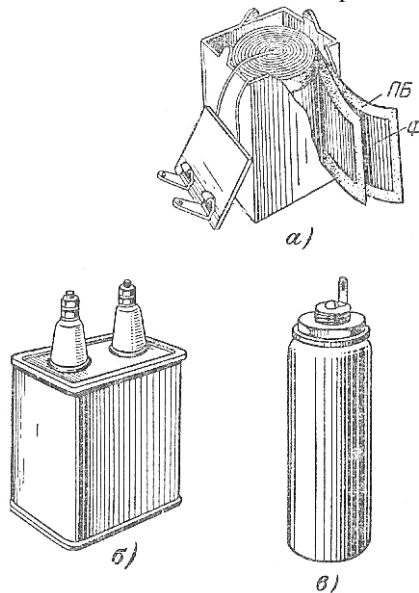


Рисунок 4.1-Конденсатори а), б) - паперові, в)електролітичні.

Назва конденсатора залежить від діелектрика , який використовується між пластинами, наприклад: діелектрик - повітря, конденсатор-повітряний; діелектрик - слюда, конденсатор - слюдяний.

Розміри конденсатора залежать, від напруги прикладеної до конденсатора. Чим більше робоча напруга, тим більше розміри конденсатора.

Ємність конденсатора - це постійна величина, яка дорівнює відношенню заряду однієї з обкладок до прикладеної напруги. Позначається - c, Φ .

$$c = \frac{q}{U}$$

Але фарада є дуже великою одиницею вимірювання, тому частіше використовують: $мк\Phi$ ($10^{-6} \Phi$)-мікрофарад;

$н\Phi$ ($10^{-12} \Phi$) –пікофарад;

$н\Phi(10^{-9} \Phi)$ -нанофарад.

Позначення ємності в електричних схемах вказане на рис. 4.2:

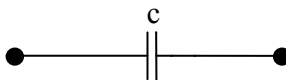


Рисунок 4.2 - Позначення ємності в електричних схемах

Окремі конденсатори з'єднуються один з одним декількома засобами: Паралельне сполучення конденсаторів - це коли кілька конденсаторів ввімкнено між одними і тими же двома вузлами так, що напруга на них однакова:

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

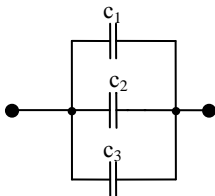


Рисунок 4.3 - Приклад паралельного сполучення конденсаторів

Тоді заряди на обкладках окремих конденсаторів:

$$q_1 = c_1 \times U, \quad q_2 = c_2 \times U, \quad q_3 = c_3 \times U,$$

а заряд, отриманий від джерела:

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

У всякому випадку сполучення конденсаторів можна замінити ємністю рівнозначного (еквівалентного) конденсатора при умові, що напруга, яка подається на обкладки еквівалентного конденсатора, буде дорівнювати напрузі, яка подається до крайніх зажимів групи цих конденсаторів. Тобто еквівалентний конденсатор накопичує той же заряд, що й група конденсаторів. Тоді, загальна ємність еквівалентного конденсатора для паралельного сполучення конденсаторів буде:

$$c = \frac{q}{U} = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{U} = c_1 + c_2 + c_3$$

Таким чином, при паралельному сполученні конденсаторів загальна ємність еквівалентного конденсатора дорівнює сумі ємностей окремих конденсаторів цього сполучення.

Послідовне сполучення конденсаторів - це коли кілька конденсаторів ввімкнено так, що на обкладках окремих конденсаторів електричні заряди рівні за величиною:

$$q = q_1 = q_2 = q_3$$

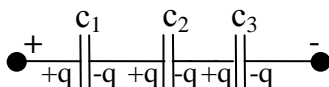


Рисунок 4.3 - Приклад послідовного сполучення конденсаторів

Від джерела живлення заряди поступають лише на зовнішні обкладки кола конденсаторів, а на з'єднаних між собою внутрішніх обкладках суміжних конденсаторів виникає переніс заряду з тією ж величиною з однієї обкладки на іншу. Тому на них з'являються рівні й різнойменні заряди. При цьому напруга між обкладками окремих конденсаторів залежить від ємностей цих

конденсаторів:
$$U_1 = \frac{q}{c_1} \quad U_2 = \frac{q}{c_2} \quad U_3 = \frac{q}{c_3}$$

Загальна напруга буде:
$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Тоді, загальна ємність еквівалентного конденсатора для послідовного сполучення конденсаторів буде:

$$c = \frac{q}{U} = \frac{q}{U_1 + U_2 + U_3} \Rightarrow \frac{1}{c} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{q} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3}$$

Таким чином, при послідовному сполученні конденсаторів величина, яка обернена загальній ємності еквівалентного конденсатора, дорівнює сумі обернених величин ємностей окремих конденсаторів цього сполучення.

Змішане сполучення конденсаторів - це коли у колі є як послідовне так і паралельне сполучення конденсаторів. Для цього сполучення притаманні властивості паралельного та послідовного з'єднання конденсаторів.

4.2 Плоский конденсатор

Коли провідники плоскі (металеві пластинки) та паралельно розташовані, то конденсатор називається плоским. Для отримання великої ємності конденсатора потрібно було би брати дві достатньо великі пластини, що незручно у практиці. Тому беруть маленькі пластини, але в потрібній кількості, й з'єднують їх як показано на рис. 4.4. У цьому випадку роль великої пластини, яка заряджена позитивно, виконують усі маленькі пластинки, зарядженні позитивно й з'єднанні між собою; роль великої пластини, яка

заряджена негативно, виконують усі маленькі пластинки, зарядженні негативно

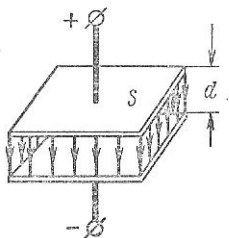


Рис. 8-8
Плоский конденсатор.

та з'єднанні між собою.

Ємність плоского конденсатора, який складається з двох пластин, прямо пропорційна площині його пластин (обкладок), та обернено пропорційна товщині діелектрика (відстань між пластинами) та залежить від властивостей діелектрика, який заповнює простір між пластинами:

$$C = \frac{\epsilon \times \epsilon_0 \times S}{d} = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\epsilon \times S}{d},$$

де S - площа пластин, m^2

d - товщина діелектрика (відстань між пластинами), m

ϵ - відносна діелектрична проникність діелектрика,

ϵ_0 - електрична постійна вакууму, $\frac{\Phi}{m}$

Сила взаємодії між обкладками плоского конденсатора - F, H .

$$F = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\epsilon \times E^2 \times S}{2}$$

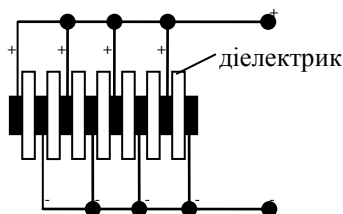


Рисунок 4.4 - Схема з'єднання пластин у плоскому конденсаторі

Для плоского конденсатора з n пластинами ємність визначається за

формулою:

$$C = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\epsilon \times S \times (n-1)}{d}$$

Таким чином, ємність плоского конденсатора не залежить від величини прикладеної напруги та величини заряду, конденсатор має постійну ємність при незмінній діелектричній проникності діелектрика. Коли між пластинами плоского конденсатора розташовані два різних діелектрика, то конденсатор представляють, як два послідовно з'єднаних конденсатора з ємностями:

$$c_1 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\varepsilon_1 \times S}{d_1},$$

$$c_2 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\varepsilon_2 \times S}{d_2},$$

де ε_1 та d_1 - діелектрична проникність та товщина першого діелектрика,

ε_2 та d_2 - діелектрична проникність та товщина другого діелектрика.

Так як загальна ємність еквівалентного конденсатора для послідовного

сполучення конденсаторів буде: $\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}$, то

$$c = \frac{c_1 \times c_2}{c_1 + c_2} = \frac{\varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times S}{\varepsilon_1 \times d_2 + \varepsilon_2 \times d_1}$$

При послідовному сполученні заряди однакові, тоді загальна напруга буде:

$$U = \frac{q}{c}$$

Напруги на першому та другому конденсаторах:

$$U_1 = U \times \frac{c}{c_1} = U \times \frac{d_1 \times \varepsilon_2}{\varepsilon_1 \times d_2 + \varepsilon_2 \times d_1} \quad \text{та} \quad U_2 = U \times \frac{c}{c_2} = U \times \frac{d_2 \times \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \times d_2 + \varepsilon_2 \times d_1}$$

Напруженості електричного поля у першому та другому шарах діелектрика:

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = U \times \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 \times d_2 + \varepsilon_2 \times d_1} \quad \text{та} \quad E_2 = \frac{U_2}{d_2} = U \times \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 \times d_2 + \varepsilon_2 \times d_1}$$

Тобто напруженості поля обернено пропорційні діелектричним проникностям:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

4.3 Циліндричний конденсатор

У циліндричному конденсаторі електричне поле утворюється між двома циліндричними поверхнями з загальною віссю й має радіальний напрямок.

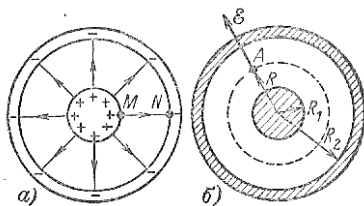


Рисунок 4.5 –Циліндричний конденсатор

Ємність циліндричного конденсатора буде дорівнювати:

$$C = 8,85 \times 10^{-12} \frac{2\pi \times \varepsilon \times l}{\ln \frac{R_2}{R_1}},$$

де l - довжина конденсатора, м

R_1 та R_2 - радіуси внутрішнього та зовнішнього циліндрів відповідно, м
Напруженість електричного поля у точці, яка удалена від вісі на відстань L :

$$E = \frac{U}{L \times \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Найбільша напруженість поля - на поверхні внутрішнього циліндра, найменша - на поверхні зовнішнього, а найменша напруженість на поверхні внутрішнього циліндра має місце, коли внутрішній діаметр менше зовнішнього в $e=2,7$ раз.

4.4 Енергія електричного поля конденсатора

Всякий заряджений конденсатор володіє енергією, яку він отримує у процесі зарядки (W). При розрядці конденсатор віддає цю енергію: половину на створення електричного поля (W_0) й половину на виділення тепла (W_m). Енергія конденсатора дорівнює тій роботі, яка виконується при збільшенні потенціалу на обкладинках конденсатора від нуля до величини прикладеної напруги (U) - W , Дж.

$$W = W_0 + W_m = \frac{q \times U}{2} + \frac{q \times U}{2} = \frac{C \times U^2}{2} + \frac{C \times U^2}{2}$$

5 Найпростіше електричне коло та його елементи

5.1 Електричні кола та його елементи. Схема електричного кола

Електричне коло - це сукупність електротехнічних пристроїв, які утворюють шлях для проходження електричного струму. Електрична схема (чи схема електричного кола) - це графічне зображення електричного кола, яке відображає його властивості й послідовність з'єднання його ділянок (рис.5.1).

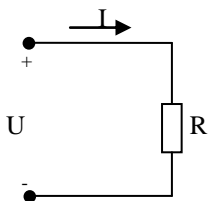


Рисунок 5.1 - Приклад схеми електричного кола

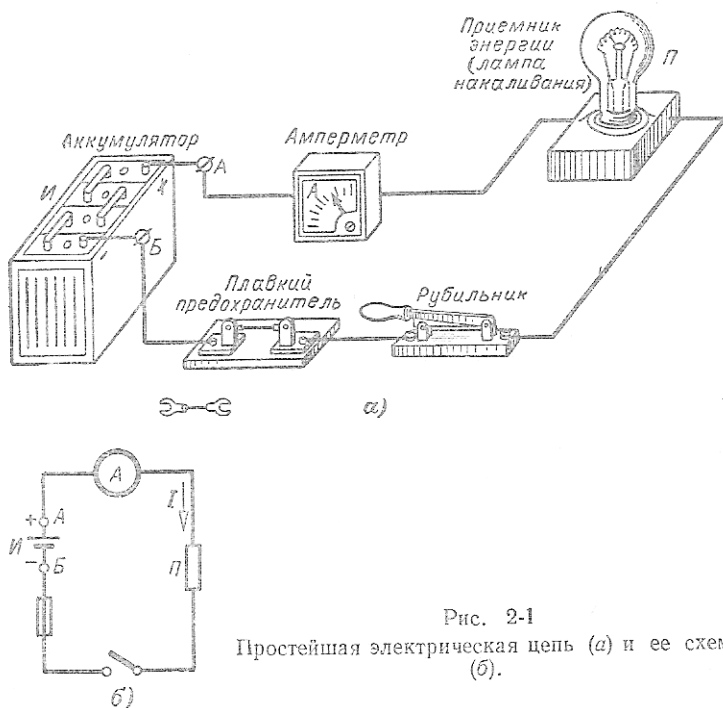


Рис. 2-1

Простейшая электрическая цепь (а) и ее схема (б).

Елементи електричного кола:

1 Джерела живлення або електроенергії. Це елементи, які дозволяють переміщувати електричний заряд від меншого потенціалу до більшого. Як джерела живлення використовуються генератори (електричні машини, які перетворюють механічну енергію в електричну), первісні елементи й акумулятори (перетворюють хімічну енергію в електричну), термогенератори (термопари). Таким чином, в джерелі живлення відбувається перетворення будь-якого виду енергії в електричну. В результаті роботи неелектричних сил кожний одиничний заряд при русі усередині джерела придбає енергію. Величина, яка чисельно дорівнює цій енергії, називається електрорушійною силою (ЕРС). Таким чином, ЕРС - це величина, яка чисельно дорівнює енергії, яку отримує усередині джерела одиничний електричний заряд в результаті роботи неелектричних сил. Позначається - E, B . ЕРС - векторна величина, направлена від негативного затискача до позитивного.

Різниця ЕРС та напруги уявляє собою енергію, яка перетворюється у тепло при переміщенні заряду в джерелі живлення й називається внутрішнім падінням напруги. Позначається - U_0, B .

$$U_0 = E - U$$

Джерело з його внутрішнім опором (будемо позначати як r_0) розглядають як внутрішнє електричне коло. Споживачів та провода - як зовнішнє електричне коло. При відключенні зовнішнього кола ЕРС дорівнює напрузі на зажимах джерела. Устаткування, в якому виникає ЕРС, називають джерелом ЕРС. Ідеальне джерело ЕРС - це джерело електричної енергії, на зажимах якого напруга постійна й не залежить від струму, який проходить через джерело. Устаткування, в якому виникає струм, називають джерелом струму. Ідеальне джерело струму - це джерело електричної енергії, через яке проходить струм, який є постійним й незалежним від напруги на затискачах цього джерела. Умовні графічні зображення джерел живлення вказані на рисунках 5.2 ÷ 5.4.

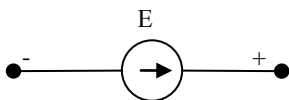


Рисунок 5.2 - Умовне графічне зображення ідеального джерела ЕРС

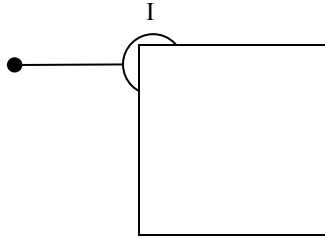


Рисунок 5.3 - Умовне графічне зображення ідеального джерела струму

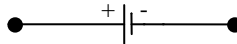


Рисунок 5.4 - Умовне графічне зображення первісного елементу

2 Споживачі електричної енергії (приймачі). В них електроенергія перетворюється у теплову, механічну, хімічну тощо енергії. Споживачами електроенергії є електродвигуни, електропечі, електролізні, термічні, зварювальні устаткування, освітлювальні та побутові прилади, холодильне устаткування, радіо й телеустаткування, медичне та інше устаткування спеціального призначення. Напруга на затискачах споживача - це величина, яка чисельно дорівнює електричній енергії, яка перетворена кожним одиничним електричним зарядом у споживачі. Споживачі електроенергії в електричних схемах характеризуються опором. Напруга на кінцях опору називається падінням напруги.

3 Проводи для передачі електроенергії. Передача електроенергії на відстані виконується за допомогою лінії електропередач (ЛЕП), які діляться на повітряні та кабельні. Проводи виготовляються алюмінієві чи мідні, бувають ізольовані та неізольовані.

4 Комутаційна апаратура - рубильники, контактори, вимикачі...

5 Прилади захисту й автоматики - реле, запобіжники...

6 Вимірювальні прилади - амперметри, вольтметри, ватметри...

7 Прилади обліку - лічильники електроенергії, потужності...

5.2 Електроенергія. Потужність та ККД

Для переносу зарядів у замкнутому колі джерело електроенергії витрачає енергію, яка дорівнює добутку ЕРС джерела на кількість заряду, який перенесений через це коло - $W_1, \text{Дж}$.

$$W_1 = E \times q$$

Якщо напруга на зажимах джерела постійна, електроенергія, яка витрачається у зовнішньому колі - W_2 , Дж.

$$W_2 = U \times q$$

Частина енергії у електричному колі витрачається:

$$W_0 = W_1 - W_2 = E \times q - U \times q = q \times E - U \times q = q \times U_0 = A_0$$

Таким чином, електроенергія - це робота струму.

Потужність - це швидкість, з якою виконується робота, чи швидкість, з якою відбувається перетворення енергії, і яка числено дорівнює відношенню роботи до часу, за який вона була виконана. Позначається - P , Вт.

$$P = \frac{A}{t} = \frac{U \times q}{t} = \frac{U \times I \times t}{t} = U \times I$$

Величина, яка характеризує швидкість, з якою відбувається перетворення механічної чи іншого виду енергії в електричну в джерелі, називається

потужністю генератора:
$$P_1 = \frac{A_1}{t} = \frac{E \times I \times t}{t} = E \times I$$

Величина, яка характеризує швидкість, з якою відбувається перетворення електричної енергії в інші види енергії у зовнішньому колі, називається

потужністю споживача:
$$P_2 = \frac{A_2}{t} = \frac{U \times I \times t}{t} = U \times I$$

Потужність, яка характеризує нетехнологічні витрати електроенергії, наприклад на теплові втрати усередині генератора, називається потужністю втрат:

$$P_0 = \frac{A_1 - A_2}{t} = \frac{U_0 \times I \times t}{t} = U_0 \times I$$

По закону збереження енергії:
$$P_1 = P_2 + P_0$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) показує яка частина, чи який відсоток енергії перетворено, а який втрачено:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{P_2}{P_2 + P_0} \times 100$$

ККД вказується у паспортних даних електрообладнання.

5.3 Закон Джоуля - Ленца

При проходженні струму в провіднику відбувається перетворення електричної енергії у теплову. Швидкість процесу перетворення

характеризується потужністю:
$$P = U \times I$$

Згідно закону Ома: $U = I \times R$, B , тоді теплова потужність буде:

$$P = I^2 \times R \quad \text{або} \quad P = \frac{U^2}{R}$$

Кількість електроенергії перетвореної у теплову за час t дорівнює:

$$W = P \times t = I^2 \times R \times t$$

Тобто, при проходженні струму в провіднику відбувається зіткнення заряджених часток з молекулами та іонами. При цьому енергія часток передається молекулам, що призведе до нагрівання провідника. Цей процес нагріву провіднику при проходженні по ньому струму описує закон Джоуля-Ленца: кількість тепла, яке виділяється струмом у провіднику, пропорційна квадрату струму, опору провідника та часу проходження струму скрізь

провідник: Q -[Дж]

$$Q = I^2 \times R \times t$$

6 Режими роботи джерела електричної енергії

6.1 Узагальнений закон Ома

Вузол електричного кола - це місце з'єднання трьох і більше гілок. Між собою. Вузли позначаються літерами А,Б,В...,або цифрами 1,2,3...

Гілкою електричного кола називають, частину електричного кола по якій проходить струм одного напрямку та одного значення.

Просте електричне коло - це коло, яке має один замкнений контур (рис.6.1).

Для електричного кола з внутрішнім колом, яке має одне джерело живлення з ЕРС E та внутрішнім опором r_0 , й зовнішнім колом, яке має опір R :

$$E = U_0 + U$$

У простому колі струм на всіх ділянках кола один, тому згідно закону Ома:

$$E = I \times r_0 + I \times R$$

Таким чином, струм у колі буде дорівнювати:
$$I = \frac{E}{r_0 + R}$$

Цей вираз називають законом Ома для електричного кола чи узагальненим законом Ома.

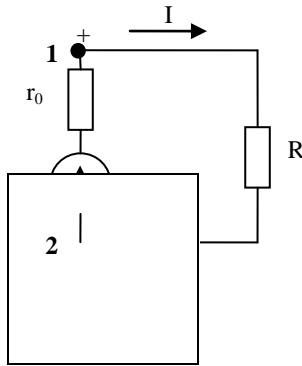


Рисунок 6.1 - Схема найпростішого електричного кола

6.2 Електричне коло з декількома джерелами ЕРС

У випадку, коли в електричне коло ввімкнено два й більше джерел живлення, обирають напрямок струму за більшим значенням ЕРС. Якщо напрямки двох та більше ЕРС, не співпадають, то вони направлені зустрічно, по відношенню один до одного. Нехай $E_2 < E_1$, тоді оберемо напрямок струму за джерелом E_1 . (рис.6.2).

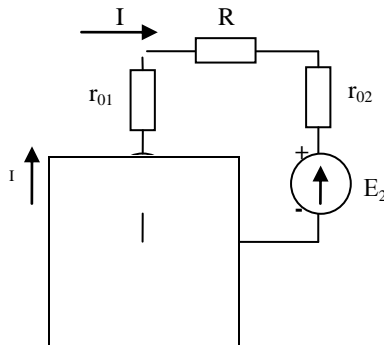


Рисунок 6.2 - Схема електричного кола з двома джерелами ЕРС

Таким чином, існує два режими роботи джерела електричної енергії:

- режим генератора (тобто джерело виробляє електричну енергію). При $E_1 \gg E_2$ джерело з E_1 працює в цьому режимі. Напрямок E_1 збігається з напрямком струму у зовнішньому колі, а величина ЕРС цього джерела дорівнює сумі напруги на його зажимах й внутрішньому падінню напруги:

$$E_1 = U_1 + I \times r_{01}$$

Таким чином, напруга на затискачах джерела, яке працює у режимі генератора, дорівнює різниці ЕРС джерела та внутрішнього падіння напруги:

$$U_1 = E_1 - U_{01} = E_1 - I \times r_{01}$$

- режим споживача (тобто джерело споживає електричну енергію). Джерело проти-ЕРС працює в цьому режимі (при $E_1 \gg E_2$ - це джерело з E_2). E_2 направлена назустріч струму у зовнішньому колі. Напруга на зажимах джерела, яке працює у режимі споживача, дорівнює сумі ЕРС й внутрішнього падіння напруги: $U_2 = E_2 + U_{02} = E_2 + I \times r_{02}$, В

Висновок: у загальному випадку напруга на затискачах джерела ЕРС (між позитивним й негативним затискачами) дорівнює:

$$U = \varphi_+ - \varphi_- = E \pm I \times r_0,$$

де «+» - якщо джерело працює у режимі споживача,

«-» - у режимі генератора.

Таким чином струм у колі буде дорівнювати

$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_{01} + R + r_{02}}$$

6.3 Баланс потужностей

Алгебраїчна сума потужностей всіх джерел дорівнює сумі потужностей всіх споживачів:

$$\sum P_{дж} = \sum P_{сп}$$

Розглянемо випадки:

- ідеальне джерело ЕРС працює в режимі генератора: так як ЕРС - це робота неелектричних сил для переносу одиничного заряду від одного зажиму джерела до іншого, то: $P_{дж} = \frac{A}{t} = \frac{E \times I \times t}{t} = E \times I$
- ідеальне джерело ЕРС працює в режимі приймача: так як ЕРС направлена назустріч струму, то: $P_{дж} = -E \times I$
- ідеальне джерело струму: $P_{дж} = U_{21} \times I$,
де U_{21} - це напруга на зажимах джерела струму, В
- опір (враховуючи внутрішній опір джерел живлення): на опорах згідно закону Джоуля-Ленца електрична енергія перетворюється в теплову (відбувається нагрів проводів, джерел, споживачів), тобто:

$$P_{np} = I^2 \times R = \frac{U^2}{R}$$

При цьому теплова потужність не залежить від напрямку струму.

6.4 Потенціальна діаграма

Потенціальна діаграма-це графік розподілу потенціалів, вздовж замкнутого контуру з опорами. При побудові потенціальної діаграми по осі абсцис (OX) відкладають у масштабі значення опорів ділянок у тій черзі, в якій вони знаходяться у колі при обході контура. Іноді замість опорів відкладають довжини ділянок, з яких будується коло. А по осі ординат (OY) відкладають у масштабі значення потенціалів відповідних точок. Кінці ординат з'єднують прямими відрізками.

Для побудови потенціальної діаграми потрібно визначити потенціали окремих точок електричного кола. Для визначення потенціалів окремих точок електричного кола потенціал точки, яка з'єднана з землею, приймається рівним нулю, а потенціали інших точок визначаються за законом Ома та формулою, за якою знаходиться напруга на зажимах джерела живлення (між позитивним та негативним затискачами):

$$U = I \times R,$$

$$U = \varphi_+ - \varphi_- = E \pm I \times r_0,$$

де «+» - якщо джерело працює у режимі споживача,

«-» - якщо джерело працює у режимі генератора.

Таким чином, потенціал точки - це напруга між даною точкою та землею:

$$U = \varphi - \varphi_0$$

Потенціал точки, можливо виміряти за допомогою, вольтметра присьдуючи один затискач, до вимірювальної точки а інший до заземленої точки.

Слід пам'ятати, що струм в опорах виникає під дією електричних сил й добутокво направлений від точки з більш високим потенціалом до точки з меншим потенціалом.

Принцип будови потенціальної діаграми для електричного кола розглянемо на прикладі схеми вказаної на рисунку 6.3.

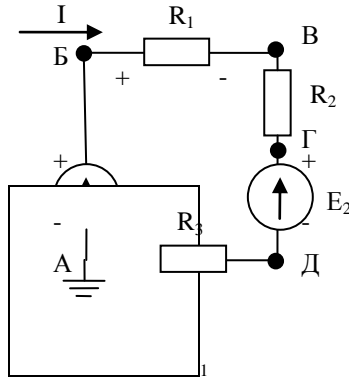


Рисунок 6.3- Схема електричного кола для побудови потенціальної діаграми

- 1 Оберемо точки в колі, де можлива зміна потенціалу. Позначимо їх А,Б,В...
- 2 Визначимо напрямок струму та потенціалів у колі: струм в опорах направлений від точки з більш високим потенціалом до точки з меншим потенціалом. Струм розрахуємо за узагальненим законом Ома:

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

- 3 Приймаємо потенціал заземленої точки рівним нулю: $\varphi_A = 0$, координати $(x=0, y=0)$
- 4 Складаємо рівняння потенціалів для кожної точки:

$$E_1 = \varphi_B - \varphi_A, \text{ тоді:}$$

$\varphi_B = \varphi_A + E_1$, $(x=0, y=\varphi_B)$, так як джерело E_1 працює як генератор

$$\varphi_B = \varphi_B - I \times R_1, (x=R_1, y=\varphi_B),$$

$$\varphi_\Gamma = \varphi_B - I \times R_2, (x=R_2, y=\varphi_\Gamma),$$

$E_2 = \varphi_\Gamma - \varphi_\Delta$ (так як джерело E_2 працює як споживач), тоді

$$\varphi_\Delta = \varphi_\Gamma - E_2, (x=0, y=\varphi_\Delta),$$

тоді $\varphi_A = \varphi_\Delta - I \times R_3, (x=R_3, y=\varphi_A)$

- 5 Будуємо потенціальну діаграму у масштабі (рисунок 6.4.)
- 6 Визначаємо сумарний опір контуру, та відкладаємо його по вісі OX

$$\sum R = R_1 + R_2 + R_3$$

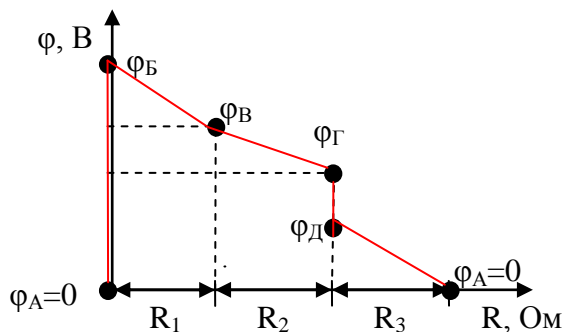


Рисунок 6.4- Потенціальна діаграма для кола вказаного на рис.6.3

7 Розрахунок лінійних електричних кіл постійного струму

7.1 Закони Кірхгофа

На усіх ділянках нерозгалуженого кола (коло, яке має один замкнений контур) постійний струм має однакове значення. Коли коло розгалужене, то значення струму у гілках різне. Тому для розрахунку лінійних електричних кіл постійного струму використовують закони (чи правила) Кірхгофа, які названі в ім'я німецького вченого, який їх відкрив.

I закон Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів, які входять в вузол, дорівнює

нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

де n - кількість струмів, які входять в вузол ,

I_i - i -тий струм, A

При цьому струми, які направленні до вузла, вважаються додатними, а від вузла - від'ємними.

Фізичний смисл I закона Кірхгофа, полягає в тому ,що заряди в вузлі не накопичуються. За I законом Кірхгофа, можливо скласти стільки рівнянь, скільки вузлів-1. За I законом Кірхгофа, перевіряють баланс за струмом.

II закон Кірхгофа: у замкненому колі алгебраїчна сума падінь напруги в окремих опорах дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, які ввімкнені у це коло:

$$\sum_{i=1}^n I_i \times R_i = \sum_{j=1}^k E_j ,$$

де n - кількість опорів у контурі,

k - кількість ЕРС у контурі.

Приймаємо напрямок обходу по контуру, за або проти годинникової стрілки.

Коли напрямок обходу контуру збігається з ЕРС, то її значення приймають позитивним, та навпаки. Падіння напруги на опорі позитивне там, де напрямок струму збігається з обходом контура, та навпаки. Коли контур не має джерел

II закон Кірхгофа має вигляд:
$$\sum_{i=1}^n I_i \times R_i = 0$$

За II закон Кірхгофа, можливо скласти стільки рівнянь, стільки контурів, або скільки невідомих струмів. За II закон Кірхгофа, перевіряють баланс за напругою.

7.2 Застосування законів Кірхгофа

Закони Кірхгофа використовуються для розрахунку багатоконтурних лінійних електричних кіл, коли закону Ома для розрахунку не досить.

Алгоритм розрахунку:

- 1 Позначають вузли електричного кола, як А, Б...
- 2 Обирають напрямок струмів у кожній гілці та напрямок обходу контурів кола.
- 3 Складають рівняння за I законом Кірхгофа для вузлів кола. Кількість рівнянь повинна бути на одне менше ніж кількість вузлів.
- 4 Складають рівняння за II законом Кірхгофа для обраних контурів. Вирішують отриману систему рівнянь відносно невідомих струмів. Якщо знайдений струм від'ємний, то напрямок струму був обраний невірно і його треба змінити.

7.3 Врахування джерел струму

При розрахунках електричних кіл можливо перетворення джерела струму у джерело ЕРС при умові, що джерело струму шунтоване (паралельне

ввімкнений опір) та навпаки при умові, що до джерела ЕРС послідовно ввімкнено резистивний елемент. На рисунку 7.1 вказаний принцип перетворення джерела струму в джерело ЕРС і навпаки.

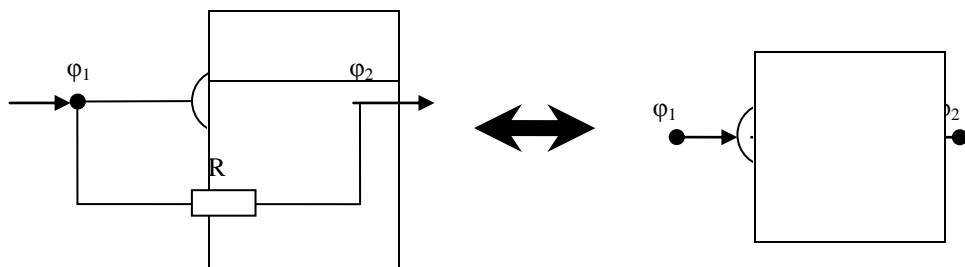


Рисунок 7.1 - Принцип перетворення джерела струму в джерело ЕРС і навпаки

8 Еквівалентні перетворення в лінійних електричних схемах

Послідовне сполучення резисторів (опорів) - це коли опори ввімкненні так, що утворюють нерозгалужену ділянку кола, та по ним проходить один і той же струм (рис 8.1):

$$I = I_1 = I_2$$

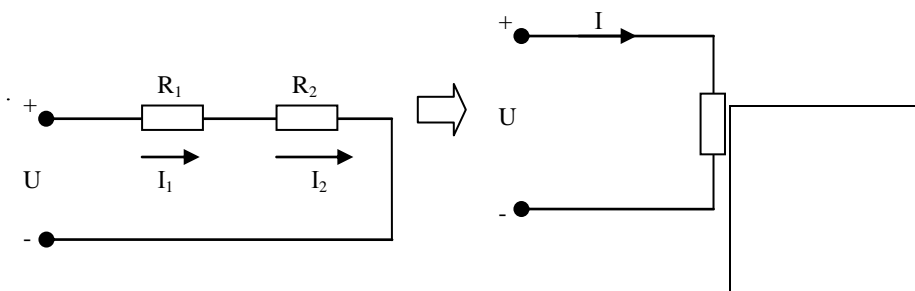


Рисунок 8.1 - Послідовне сполучення опорів та їх спрощення

При послідовному сполученні резисторів падіння напруги в окремих опорах пропорційно значенню опорів:

$$U_1 : U_2 = R_1 : R_2$$

Тому сума падінь напруги в окремих опорах дорівнює напрузі, яка прикладена до кола:

$$U = U_1 + U_2 = I_1 \times R_1 + I_2 \times R_2$$

Потужність всього кола теж дорівнює сумі потужностей окремих ділянок:

$$P = P_1 + P_2 = U_1 \times I_1 + U_2 \times I_2$$

Тобто потужність, яка виникає на окремих ділянках кола, пропорційна значенню опорів цих ділянок:

$$P_1 : P_2 = R_1 : R_2$$

Для розрахунку електричних кіл зручно заміняти послідовне з'єднання опорів одним рівнозначним (загальним, еквівалентним) опором, значення якого повинно бути таким, щоб при цьому же струмі напруга між кінцями еквівалентного опору дорівнювала напрузі цього кола:

$$U = I \times R_{екв} \quad \Rightarrow \quad R_{екв} = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I} = R_1 + R_2$$

Якщо. $R_1=R_2=R_3=...R_n$, то $R_{екв} = R_n * n$

Таким чином, еквівалентний опір при послідовному сполученні резисторів дорівнює сумі окремих опорів цього сполучення. При послідовному з'єднанні приймачів при відключенні одного приймача спостерігається розрив кола, тобто відключення всіх приймачів електроенергії. Послідовне з'єднання споживачів використовують коли напруга джерела перевищує номінальну напругу приймачів.

Паралельне сполучення резисторів (опорів) - це коли кілька опорів ввімкнено між одними і тими ж двома вузлами так, що напруга на них однакова (рис.8.2):

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

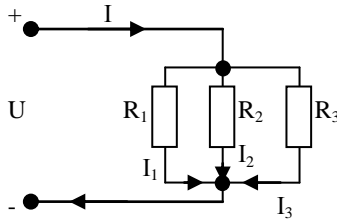


Рисунок 8.2 - Паралельне сполучення опорів

При паралельному сполученні резисторів розподілення струмів в окремих опорах прямопропорційно значенню провідностей чи зворотнопропорційно значенню опорів:

$$I_1 : I_2 : I_3 = G_1 : G_2 : G_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$$

Згідно I закону Кірхгофа для паралельного з'єднання опорів:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Загальна провідність кола дорівнює сумі провідностей окремих віток:

$$G = G_1 + G_2 + G_3$$

Потужність всього кола, як й при послідовному сполученні, дорівнює сумі потужностей окремих ділянок:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 \times I_1 + U_2 \times I_2 + U_3 \times I_3$$

Для зручного розрахунку кіл паралельне з'єднання опорів замінюють одним еквівалентним опором так, щоб при струмі, який дорівнює сумі струмів в окремих гілках, напруга між кінцями еквівалентного опору дорівнювала

напрузі цього кола: $U = I \times R_{екв}$ $R_{екв} = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_1 + I_2 + I_3}$

$$\frac{1}{R_{екв}} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} + \frac{I_3}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Тобто еквівалентний опір двох паралельних віток буде мати вигляд:

$$R_{12} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Тобто, еквівалентний опір при паралельному сполученні буде менше, ніж самий менший з опорів. При паралельному з'єднанні n рівних опорів R

еквівалентний опір буде: $R_{екв} = \frac{R}{n}$

При паралельному з'єднанні приймачів режим роботи одного не впливає на режим роботи іншого та напруга на кожному приймачі постійна. Тому приймачі, які потребують постійної напруги (лампи, двигуни...), звичайно

з'єднуються паралельно. У практиці отримало розповсюдження змішане сполучення резисторів.

Змішане сполучення резисторів (опорів) - це коли у колі є як послідовне так і паралельне сполучення резисторів чи ділянок кола. Для цього сполучення притаманні властивості паралельного та послідовного з'єднання опорів.

9 Поняття про трикутник та зірку з пасивних елементів кола

9.1 Перетворення трикутників опорів в еквівалентну зірку та навпаки

Сполучення “зірка” - це електричне коло, яке складається з трьох гілок, один кінець яких сходиться в одну загальну точку (рис.9.1).

Сполучення “трикутник” - це електричне коло, яке складається з трьох гілок, кінці яких з'єднуються в три вузли, та коло має вигляд трикутника (рис.9.2).

А Б С

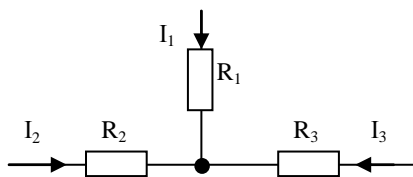


Рисунок 9.1 - Сполучення зіркою

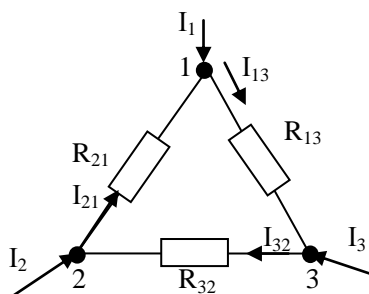


Рисунок 9.2 - Сполучення трикутником

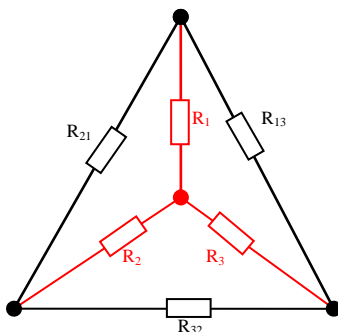


Рисунок 9.3 - Перетворення трикутників опорів в еквівалентну зірку і навпаки
 Формули перетворення зірки в еквівалентний трикутник:

$$R_{13} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \times R_3}{R_2}$$

$$R_{32} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \times R_3}{R_1}$$

$$R_{21} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \times R_2}{R_3}$$

Перетворення трикутника в еквівалентну зірку:

$$R_1 = \frac{R_{13} \times R_{21}}{R_{13} + R_{21} + R_{32}}$$

$$R_2 = \frac{R_{32} \times R_{21}}{R_{13} + R_{21} + R_{32}}$$

$$R_3 = \frac{R_{13} \times R_{32}}{R_{13} + R_{21} + R_{32}}$$

При перетворенні потрібно, щоб при незмінних значеннях напруги між вершинами трикутника й зірки струми у проводах, які з'єднують ці вершини з іншими ділянками кола, залишалися незмінні. Трикутник й зірка, які відповідають цим вимогам, називаються рівнозначними (або еквівалентними).

9.2 Сполучення джерел живлення

Джерела живлення (або акумулятори) для збільшення потужності при маленькому значенні напруги з'єднують у батареї. З'єднання дозволяється лише для однорідних елементів, які мають однакові ЕРС та внутрішні опори.

Існує три засоби сполучення елементів у батарею:

- Послідовне (рис.9.4).

Використовується, коли струм споживача не перевищує номінального струму елемента, а напруга споживача (U) більше ЕРС одного елемента (E_0).

Кількість елементів у батареї знаходиться як:

$$n \geq \frac{U}{E_0}$$

У всіх елементів ЕРС повинні мати однаковий напрямок (для чого негативний затискач першого елемента з'єднується з позитивним затискачем другого елемента й так далі). Ємність батареї в цьому випадку дорівнює ємності одного елемента, а ЕРС батареї буде:

$$E = n \times E_0$$

Внутрішній опір батареї буде:

$$R = n \times r_0$$



Рисунок 9.4 - Послідовне сполучення джерел живлення

- Паралельне (рис.9.5).

Використовується, коли струм споживача (I) перевищує розрядний струм елемента (I_p), а напруга споживача (U) дорівнює ЕРС одного елемента (E_0). Кількість елементів у батареї знаходиться як:

$$n \geq \frac{I}{I_p}$$

При цьому сполученні позитивні затиски з'єднуються в один вузол, а негативні - в другий. ЕРС батареї дорівнює ЕРС одного елемента:

$$E = E_0$$

Внутрішній опір батареї буде:

$$R = \frac{r_0}{n}$$

Ємність батареї дорівнює сумі ємностей паралельно з'єднаних елементів.

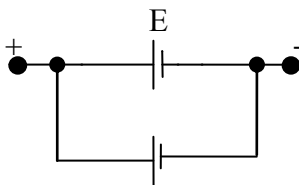


Рисунок 9.5 - Паралельне сполучення джерел живлення

- Змішане сполучення - це комбінація послідовного та паралельного з'єднання елементів. Використовується, коли номінальні напруга та струм споживача більше за ЕРС та розрядний струм одного елемента.

9.3 Розрахунок електричних кіл методом перетворення схеми (метод «згортання»)

Для полегшення розрахунків електричних кіл використовують рівнозначні (або еквівалентні) перетворення з метою спрощення схеми кола. Це перетворення зірки в трикутник чи навпаки, згортання схеми з кінця, використовуючи формули послідовного чи паралельного сполучення опорів. Суть метода «згортання» привести електричне коло до найпростішого кола. Тобто знайти еквівалентний опір всього кола та використовуючи закон Ома

знайти струми чи напруги. Цей метод використовується для розрахунку простих кіл (кола з одним джерелом живлення), коли відомі ЕРС генераторів (або напруги) та опори ділянок кола.

10 Поняття про втрату напруги у проводах ліній електропередач

10.1 Втрата напруги у проводах ліній електропередач

Передача електроенергії на відстані виконується за допомогою лінії електропередач (ЛЕП), які діляться на повітряні та кабельні. При передачі енергії частина її розходується на нагрів проводів, створення електромагнітних полів. Ці втрати електроенергії потрібно тлумачити як технологічні втрати електроенергії на її передачу, а не як у інших галузях - втрати від браку, коли порушується технологічний процес. В основному електроенергію до одного споживача передають по двом однаковим за параметрами ЛЕП для забезпечення надійності мереж. Тобто, коли аварійно відключиться одна з ЛЕП друга залишиться живити споживач.

ЛЕП складаються з проводів, які у свою чергу виготовляються з провідників, в основному з міді чи алюмінію. Всі матеріали, навіть провідники, мають опір. При передачі електроенергії по проводах довжиною більше за 10 м опором проводу нехтувати не можливо, так як струм в них викликає помітне падіння напруги згідно закону Ома: $\Delta U = I \times R$

Різниця напруг на початку U_1 та у кінці U_2 лінії називається втратою напруги:

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

$$\Delta U = IR = I \times \rho \times \frac{l}{S},$$

де S - площа поперечного перерізу проводу, мм^2

l - довжина провідника, м

ρ - питомий опір провідника, $\text{Ом} \times \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$

I - струм, який протікає по проводу, А

З метою економії енергії та для забезпечення незначного коливання напруги на затискачах приймача при зміні опору чи струму приймача втрата напруги повинна бути невелика при зрівнянні з номінальною напругою приймача.

Струм споживача (чи навантаження) при різних опорах приймача змінюється від нуля до найбільшого свого значення. Втрата напруги при цьому теж коливається від нуля до свого максимального значення. При постійній напрузі

на початку ЛЕП напруга на кінці лінії змінюється від $U_2' = U_1$ при $I=0$ та $U_2'' = U_1 - \Delta U$. Тому допустима втрата напруги у мережі дорівнює допустимому коливанню напруги на затискачах приймача.

Так як при передачі енергії по проводах частина напруги «втрачається», то також втрачається й потужність: $\Delta P = I \times \Delta U = I^2 \times R$

Тоді ККД мережі буде:

$$\eta = \frac{P_{\text{НОМ}} - \Delta P}{P_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}} \times I - \Delta U \times I}{U_{\text{НОМ}} \times I} = \frac{U_{\text{НОМ}} - \Delta U}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{U_2}{U_1}$$

Звичайно передача енергії відбувається при ККД 0,95÷0,98 й напруга на зажимах приймача відрізняється від напруги на початку лінії на 2÷5 %.

Різниця між номінальною напругою мережі й дійсною напругою мережі називається відхиленням напруги. Позначається - V , B або $V, \%$.

$$V = U_{\text{дійсна}} - U_{\text{НОМ}} \quad \text{або} \quad V\% = \frac{U_{\text{дійсна}} - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \times 100$$

В електричних мережах напругою до 20 кВ відхилення напруги на зажимах споживачів у нормальному режимі не повинні перевищувати $\pm 5 \%$, а в аварійному - $\pm 10 \%$.

Відхилення напруги небажані як у бік збільшення так й у бік зменшення по відношенню до номінальної напруги. При великих відхиленнях напруги спостерігається збільшення втрат потужності та енергії, змінюються навантаження споживачів, погіршується якість продукції, можливе бракування продукції, скорочення строку роботи елементів мережі й обладнання, порушення нормальної діяльності пристроїв автоматики і релейного захисту, що може привести до аварій та відключень споживачів. Наприклад, для ламп розжарювання при $V = +10\%$ освітленість зростає на 40%, а строк роботи зменшується у 3 рази; при $V = -10\%$ освітленість зменшується на 30%, а строк роботи збільшується у 2 рази, але зменшується продуктивність праці й погіршується стан та здоров'я людини.

У випадку коли мережа має декілька приймачів, приєднаних до різних міст лінії, втрату напруги у всій мережі визначають як суму втрат напруги на окремих її ділянках: $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_0$

Під найбільшою втратою напруги розуміють втрату напруги на шляху від джерела живлення до найбільш віддаленого споживача електроенергії мережі одного класу напруги. Причому визначають найбільшу втрату напруги як у нормальному режимі роботи електромережі, так й в аварійному (наприклад, при відключенні однієї ЛЕП з двох паралельних). Розрахункові найбільші втрати напруг повинні бути менші за найбільш допустимі, як у нормальному, так й в аварійному режимі:

- При номінальній напрузі $\geq 110 \text{ кВ}$: $\Delta U_{\max} \leq (10 \div 15)\% U_{\text{НОМ}}$
 $\Delta U_{\max} \leq 25\% U_{\text{НОМ}}$
- При номінальній напрузі $= 35 \text{ кВ}$: $\Delta U_{\max} \leq 6\% U_{\text{НОМ}}$
 $\Delta U_{\max} \leq 10\% U_{\text{НОМ}}$.

10.2 Вибір перерізу проводів за допустимою втратою напруг

Струмоведучі частини електрообладнання апаратів, розподільчих устроїв промислових підприємств повинні тривало видержувати робочі струми без черезмірного підвищення температури, протистояти короточасній дії струмів короткого замикання, задовольняти вимогам економічної роботи електрообладнання. Кількість тепла, яка виділяється у проводах при протіканні струму, у першому приближенні пропорційна квадрату цього струму (за законом Джоуля-Ленца $Q = I^2 R t$). В свою чергу величина струму залежить від розрахункових навантажень електрообладнання.

При визначенні розрахункових навантажень на промислових підприємствах користуються значеннями розрахункової потужності - P_p . В залежності від режиму роботи розрахункову потужність визначають за різними формулами. Наприклад, для двигунів тривалого режиму роботи та освітлення приміщень : $P_p = P_{\text{НОМ}}$ ($P_{\text{НОМ}}$ - номінальна потужність споживача, Вт).

Для групи споживачів розрахункову потужність знаходять за формулою :

$$P_{p\Sigma} = \sum P_p \times K_{\Pi},$$

де K_{Π} - коефіцієнт попиту у відносних одиницях, приймається за довідником

$$(K_{\Pi} \leq 1)$$

Тоді визначають розрахунковий струм, який протікає по проводу:

$$I_p = \frac{P_p}{U_{\text{НОМ}}}$$

Таким чином, переріз проводів та кабелів напругою обирають за умови його допустимого нагріву при протіканні по ньому струму: $I_{\text{ДОП}} \geq I_p$, де $I_{\text{ДОП}}$ - допустимий струм проводів та кабелів в залежності від перерізу проводу засобів прокладки, марки та класу напруги. Приймається за довідником.

Після чого обраний переріз проводу чи кабелю перевіряють на втрату напруги від джерела живлення до всіх споживачів, яка не повинна перевищувати допустимої втрати напруги : $\pm 5\%$ для силової мережі та $+5\%$ чи $-2,5\%$ для освітлювальної мережі :

$$\Delta U\% = \frac{I_p \times \rho \times l}{S \times U_{\text{НОМ}}} \times 100 ,$$

де ρ - питомий опір матеріалу проводу, $O_M \times \frac{мм^2}{м}$

l - довжина лінії, $м$

S - обраний переріз проводу, $мм^2$

У випадку перевищення розрахункової втрати напруги допустимої потрібно обрати більший ближчий стандартний переріз та знову перевірити його на втрату напруги. Розрахунок триває доки розрахункова втрата напруги не буде нижче допустимої.

Також переріз проводів та кабелів перевіряють не механічну міцність - обраний переріз проводів не повинен бути менше ніж мінімально допустимий :

- для силових кіл - $16 мм^2$,
- для кіл керування - $4 мм^2$,
- для кіл зв'язку, телекерування - $2,5 мм^2$

Для електричних мереж напругою до $1000 В$ переріз проводів повинен бути пов'язаний з вибором захисного пристрою (запобіжником, автоматичним вимикачем...). Для покращення режиму напруги у розподільчих мережах напругою до $35 кВ$ включно переріз проводів рекомендується визначати за допустимою втратою напруги. Алгоритм:

- 1 приймають допустиму втрату напруги у мережі. $5\% U_{НОМ}$ для силової мережі та $2,5\% U_{НОМ}$ для освітлювальної мережі.
- 2 визначають розрахунковий переріз проводу - $S_p, мм^2$:
$$S_p = \frac{I \times \rho \times l}{\Delta U_{ДОП}}$$
- 3 обирають стандартний переріз проводу за умовою: $S_{ст} \geq S_p$
- 4 обраний переріз проводу перевіряють на допустимий нагрів проводу при протіканні по ньому струму за умовою: $I_{ДОП} \geq I$ (де $I_{ДОП}$ - допустимий струм проводів та кабелів в залежності від перерізу проводу, засобів прокладки, марки та класу напруги. Приймається за довідником). У випадку перевищення струму приймача допустимого потрібно обрати більший ближчий стандартний переріз та знову перевірити його. Розрахунок триває доки струму приймача не буде нижче допустимого.

10.3 Вибір раціональних напруг

Як видно з формули $S = \frac{I \times \rho \times l}{U}$ відносно малий переріз для передачі

великих потужностей на великі відстані буде, коли використати для мережі високі напруги. Таким чином, одним з засобів зниження втрат напруги та електроенергії на її передачу є перевод мережі на більш великий клас напруги. Наприклад, замість $6 кВ$ використати $10 кВ$. Причому чим більше відстань між джерелом живлення й споживачами, тим використовують вищий

клас напруги: 220, 330, 500, 750 кВ. При використанні великих напруг також зменшуються витрати на матеріал проводів, так як їх переріз менший. Але з другого боку збільшуються витрати на капітальні вкладення: встановлення додаткового обладнання на підстанціях для зменшення класу напруги споживаємої енергії та на електростанціях для збільшення класу напруги виробляємої електроенергії. У зв'язку з цим вибір класу напруги на кожній ступені електропостачання повинно виконуватись на основі техніко-економічних розрахунків.

11 Нерозгалужене коло із змінним опором

11.1 Коло зі змінним опором

Розглянемо нерозгалужене електричне коло з двома послідовно ввімкненими опорами (рис.11.1): постійним опором R_1 та змінним опором R_2 , який будемо змінювати від ∞ до 0, при постійній напрузі на затискач кола.

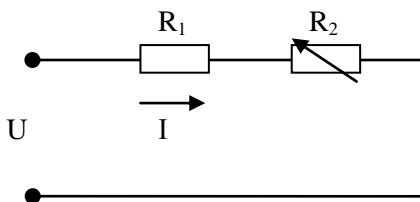


Рисунок 11.1 - Нерозгалужене електричне коло з двома послідовно ввімкненими опорами, один з яких змінний

- При $R_1 \neq R_2 \neq 0$ струм у колі буде:
$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

Падіння напруги на R_1 :

$$U_1 = I \times R_1$$

Падіння напруги на R_2 :

$$U_2 = I \times R_2 = U - U_1$$

Повна потужність кола:

$$P = U \times I$$

Потужності, які споживають приймачі:

$$P_1 = I^2 \times R_1$$

$$P_2 = I^2 \times R_2 = P - P_1$$

Чим більше R_2 , тим менший струм у колі й тим більш ККД.

- При $R_2 = \infty$ режим кола називається холостим ходом, (не робочий хід).

При цьому режимі струм у колі відсутній: $I_{XX} = \frac{U}{R_1 + \infty} = \frac{U}{\infty} = 0$

Падіння напруги на R_1 відсутнє: $U_1 = I_{XX} \times R_1 = 0$

Падіння напруги на R_2 дорівнює напрузі прикладеній до кола:

$$U_2 = U - U_1 = U - 0 = U$$

Повна потужність кола: $P_{XX} = U \times I_{XX} = U \times 0 = 0$

приймачі не споживають потужність: $P_{1XX} = I_{XX}^2 \times R_1 = 0 \times R_1 = 0$

$$P_{2XX} = P_{XX} - P_{1XX} = 0 - 0 = 0$$

• При $R_2=0$ режим кола називається режимом короткого замкнення.

При цьому режимі струм у колі найбільш можливий:

$$I_{KЗ} = \frac{U}{R_1 + 0} = \frac{U}{R_1} = I_{\max}$$

Падіння напруги на R_1 дорівнює напрузі прикладеній до кола:

$$U_1 = I_{\max} \times R_1 = U$$

Падіння напруги на R_2 відсутнє: $U_2 = U - U_1 = U - U = 0$

Повна потужність кола максимальна: $P_{KЗ} = U \times I_{\max} \rightarrow P_{\max}$

Другий приймач не споживає потужність: $P_{2KЗ} = I_{KЗ}^2 \times R_2 = I_{KЗ}^2 \times 0 = 0$

А перший споживає усю потужність від джерела живлення:

$$P_{1KЗ} = P_{KЗ} - P_{2KЗ} \approx P_{\max} - 0 \rightarrow P_{\max}$$

ККД прагне до мінімуму.

• При $R_1=R_2$ режим кола називається узгодженим режимом за потужністю.

$$I = \frac{U}{2R_1} = \frac{I_{KЗ}}{2}, \quad U_1 = U_2 = \frac{U}{2}$$

Другий приймач споживає найбільш можливу потужність у цьому колі:

$$P_2 = I^2 \times R_2 = \left(\frac{U}{2R_1} \right)^2 \times R_2 = \frac{U^2}{4R_1} = \frac{U}{4} \times \frac{U}{R_1} = \frac{U \times I_{KЗ}}{4} = P_{\max}$$

ККД дорівнює 50%, тобто половина енергії перетворюється у тепло (втрачається). Такий низький ККД не придатний для енергетичного устаткування. Але в пристроях автоматики, телемеханіки та електрозв'язку потужності малі й звичайно важливим є не ККД, а передача більшої потужності від джерел до виконавчих механізмів, тому у цих пристроях віддають перевагу згідному режиму.

11.2 Режими роботи кола

Таким чином, існують наступні режиму роботи електричного кола:

- Холостий хід (чи неробочий хід) - це режим роботи кола при розімкненому зовнішньому колі ($I=0$). Коли електричне коло ввімкнути через опір, який прагне до нескінченності (чи набагато більший за опір всього кола.

Характерно: $E_{дж} = U_{xx}$, $P_{xx} = 0$, $\eta_{xx} = 100\%$

- КЗ - це з'єднання двох проводів електричного кола, які приєднанні до різних затискачів джерела, через дуже малий опір в порівнянні з опором самих проводів, наприклад амперметр. При КЗ напруга на затискач джерела різко падає, а струм швидко збільшується до критичних величин, що може привести до сильного нагріву проводів, їх перегріву, займанню обладнання тощо, тому коло потрібно розімкнути. Для цього використовують апарати захисту від КЗ (запобіжник, вимикач). Характерно:

$$I_{KЗ} \rightarrow \max, U_{KЗ} \rightarrow \min, U_{дж} = U_0, P_{KЗ} = 0, \eta_{KЗ} \rightarrow \min$$

- Номінальний. При протіканні струму по проводах згідно закону Джоуля – Ленца відбувається нагрів проводів й віддача тепла у зовнішнє середовище. Швидкість віддачі тепла пропорційне різності температур між провідником та зовнішнім середовищем. В перший час після ввімкнення кола різність температур між проводом, устаткуванням та зовнішнім середовищем мала, тому більша кількість тепла йде на нагрів провода, а інша розсіюється у зовнішнє середовище. Провід швидко нагрівається. З ростом температури проводу збільшується кількість розсіючого тепла, тому зріст температури провода зменшується. При деякій температурі проводу, яку назвали сталою, кількість тепла, яка виділяється у проводі, дорівнює кількості розсіючого тепла у зовнішнє середовище. При дальшому проходженні незмінного струму температура провода залишається постійною. Час нагріву до сталої температури свій для кожного провідника: лампа розжарювання нагрівається секунди, а двигун - години. Режим роботи кола, при якому стала температура дорівнює нормі, називається номінальним (чи гранично допустимим), а струм, напруга, потужність... - номінальними й вказуються у паспортних даних устаткування. Нагрів провідників не можна допускати вище за сталу температуру, так як ізоляція при сильному нагріві може обвуглитися й навіть зайнятися. Перегрів голих проводів у ЛЕП приводе до зміни їх натягу.

- Перевантаження. Коли по проводу проходить струм, який не набагато більший за номінальний (десь до $30\%I_{НОМ}$), то провідник буде перевантаженим. Так як усталена температура не миттєво зростає, то короточасне перевантаження допустити можна. Цей час перевантаження регламентується в залежності від виду устаткування та його номінальних параметрів. Наприклад, перевантаження на 30% силового масляного трансформатору допускається до 6 годин при температурі зовнішнього середовища до $+25^{\circ}\text{C}$. Для захисту від перевантажень використовують теплові реле, які можуть діяти як на сигнал (коли перевантаження у колі допустиме) так і на відключення.

Режим роботи узгоджений, це коли $R_n = r_0$. При цьому режимі на споживачі виділяється максимальна потужність.

12 Розрахунок складних електричних кіл постійного струму

12.1 Розрахунок складних електричних кіл методом накладання (суперпозиції полів)

У випадку, коли в електричне коло ввімкнено два й більше джерел живлення, для розрахунку електричного кола можна використовувати метод накладання. Цей метод справедливий тільки для лінійних кіл.

Сутність методу накладання:

- 1 Вважають, що в колі діє лише одна ЕРС. При цьому всі опори кола залишаються незмінними, включаючи внутрішні опори усіх джерел живлення. Визначають часткові струми у колі від дії залишеної ЕРС. Потім аналогічні розрахунки роблять по чергову для усіх ЕРС.
- 2 Знаходять загальні струми в усіх вітках за принципом накладання, тобто сумуючи знайдені струми від різних ЕРС з урахуванням їх напрямку (якщо напрямки струмів співпадають, то в рівнянні знак “+”, не співпадають “-”).

Струм у колі може бути представлений не тільки як сума струмів від кожної ЕРС окремо, а ще як сума струмів від окремих груп ЕРС. Коли у електричному колі є джерело струму, то воно виключається разом з віткою, в яке ввімкнено.

Приклад: визначити струми в усіх вітках електричного кола, вказаного на рисунку 12.1, методом накладання:

$$\begin{aligned}E_1 &= 100\text{В}, \\E_2 &= 60\text{В}, \\R_1 &= R_2 = 30\text{Ом}, \\R_3 &= 20\text{Ом}, \\R_4 &= R_5 = 100\text{Ом}\end{aligned}$$

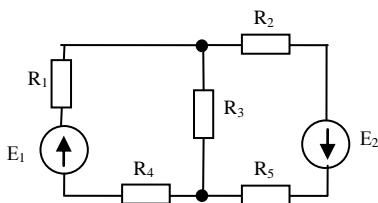


Рисунок 12.1 - Вихідне електричне коло

Розв'язання

- 1 Обираємо напрямок струмів у кожній гілці.

- 2 Вважаємо, що в колі діє лише одна $E_1=100B$ - рис.12.2. При цьому всі опори кола залишаються незмінними. Визначаємо струми у колі від дії $E_1=100B$ методом згортання.

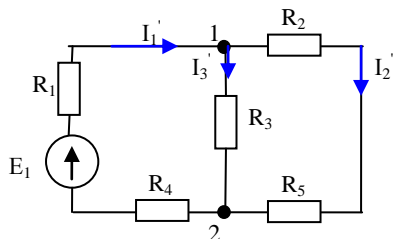


Рисунок 12.2 - Електричне коло з частковими струмами від першої ЕРС

- Так як R_2 та R_5 з'єднанні послідовно, то

$$R_{25} = R_2 + R_5 = 30 + 20 = 50 \text{ Ом}$$

- Так як R_3 та R_{25} з'єднанні паралельно, то

$$R_{325} = \frac{R_3 \times R_{25}}{R_3 + R_{25}} = \frac{100 \times 50}{100 + 50} = 33,3 \text{ Ом}$$

- Так як R_1 , R_4 та R_{325} з'єднанні послідовно, то

$$R_{\text{екв}} = R_1 + R_4 + R_{325} = 30 + 20 + 33,3 = 83,3 \text{ Ом}$$

$$\text{Згідно закону Ома: } I_1' = \frac{E_1}{R_{\text{екв}}} = \frac{100B}{83,3 \text{ Ом}} = 1,2A$$

- Так як R_1 , R_4 та R_{325} з'єднанні послідовно:

$$U_{12} = E_1 - U_1 - U_4 = E_1 - I_1' \times (R_1 + R_4) = 100 - 1,2 \times (30 + 20) = 40B$$

згідно закону Ома:

$$I_2' = \frac{U_{12}}{R_{25}} = \frac{40B}{50 \text{ Ом}} = 0,8A, \quad I_3' = \frac{U_{12}}{R_3} = \frac{40B}{100 \text{ Ом}} = 0,4A$$

- 3 Вважаємо, що в колі діє лише одна $E_2=60B$ (опори кола залишаються незмінними) - рис.12.3. Визначаємо струми у колі від дії $E_2=60B$ методом згортання:

- Так як R_1 та R_4 з'єднанні послідовно, то

$$R_{14} = R_1 + R_4 = 30 + 20 = 50 \text{ Ом}$$

Так як R_3 та R_{14} з'єднанні паралельно, то

$$R_{314} = \frac{R_3 \times R_{14}}{R_3 + R_{14}} = \frac{100 \times 50}{100 + 50} = 33,3 \text{ Ом}$$

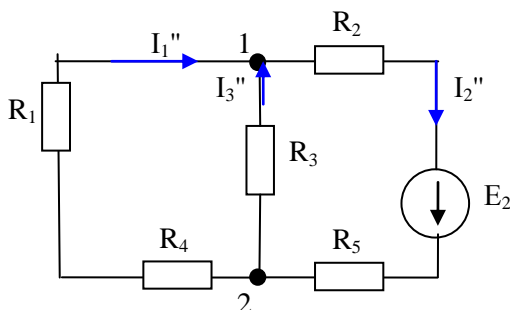


Рисунок 12.3 - Електричне коло з частковими струмами від другої ЕРС

- Так як R_{314} , R_5 та R_2 з'єднанні послідовно, то

$$R_{екв} = R_2 + R_5 + R_{314} = 30 + 20 + 33,3 = 83,3 Ом$$

Згідно закону Ома:
$$I_2'' = \frac{E_2}{R_{екв}} = \frac{60 В}{83,3 Ом} = 0,72 А$$

- Так як R_{314} , R_5 та R_2 з'єднанні послідовно:

$$U_{12} = E_2 - U_2 - U_5 = E_2 - I_2'' \times (R_2 + R_5) = 60 - 0,72 \times (30 + 20) = 24 В$$

Згідно закону Ома:

$$I_1'' = \frac{U_{12}}{R_{14}} = \frac{24 В}{50 Ом} = 0,48 А$$

$$I_3'' = \frac{U_{12}}{R_3} = \frac{24 В}{100 Ом} = 0,24 А$$

- 4 Визначаємо загальні струми в усіх вітках за принципом накладання, тобто сумуючи знайденні струми від різних ЕРС з урахуванням їх напрямку:

$$I_1 = I_1' + I_1'' = 1,2 + 0,48 = 1,68 А$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' = 0,8 + 0,72 = 1,52 А$$

$$I_3 = I_3' - I_3'' = 0,4 - 0,24 = 0,16 А$$

- 5 Перевірка за I законом Кірхгофа для вузла 1:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$1,68 - 1,52 - 0,16 = 0$$

Перевірка збігається.

12.2 Розрахунок складних електричних кіл методом контурних струмів

У випадку, коли в електричне коло ввімкнено два й більше джерел живлення, для розрахунку електричного кола можна використовувати метод контурних струмів. Сутність цього методу в тому, що по усім елементам контура протікає один й той же струм, який називають контурним.

Для визначення струмів у вітках достатньо знайти контурні струми. Для цього складають рівняння за II законом Кірхгофа для усіх контурів. Розглянемо схему електричного кола вказану на рис.12.4. Складають рівняння за II законом Кірхгофа для трьох контурів:

$$\text{I: } I_1 \times R_1 - I_2 \times R_2 + I_5 \times R_5 = E_1 - E_2$$

$$\text{II: } I_2 \times R_2 + I_3 \times R_3 + I_4 \times R_4 = E_2$$

$$\text{III: } -I_4 \times R_4 - I_5 \times R_5 + I_6 \times R_6 = E_6$$

Потім замість струмів віток підставляють вирази контурних струмів:

$$\text{I: } I_{11} \times R_1 - \overset{\curvearrowright}{I_{22} - I_{11}} \times R_2 + \overset{\curvearrowright}{I_{11} - I_{33}} \times R_5 = E_1 - E_2$$

$$\text{II: } \overset{\curvearrowright}{I_{22} - I_{11}} \times R_2 + I_{33} \times R_3 + \overset{\curvearrowright}{I_{22} - I_{33}} \times R_4 = E_2$$

$$\text{III: } -\overset{\curvearrowright}{I_{22} - I_{33}} \times R_4 - \overset{\curvearrowright}{I_{11} - I_{33}} \times R_5 + I_{33} \times R_6 = E_6$$

Приведемо подібні члени перед контурними струмами:

$$\text{I: } I_{11} \times \overset{\curvearrowright}{R_1 + R_2 + R_5} - I_{22} \times R_2 - I_{33} \times R_5 = E_1 - E_2$$

$$\text{II: } -I_{11} \times R_2 + I_{22} \times \overset{\curvearrowright}{R_2 + R_3 + R_4} - I_{33} \times R_4 = E_2$$

$$\text{III: } -I_{11} \times R_5 - I_{22} \times R_4 + I_{33} \times \overset{\curvearrowright}{R_4 + R_5 + R_6} = E_6$$

Коли напрямки контурних струмів обрані в одному напрямку, то перевіркою вірного приведення є знак «+» за діагоналлю для рівнянь (тобто для I_{11} у I контурі, для I_{22} у II контурі, для I_{33} у III контурі) й знак «-» для інших членів з лівого боку рівняння.

Коли суму усіх опорів, які входять до I контуру, позначити $R_{11}=R_1+R_2+R_5$, до II контуру - $R_{22}=R_2+R_3+R_4$, до III контуру, позначити $R_{33}=R_4+R_5+R_6$; а суму опорів між I та II контурами - $R_{12}=R_2$, між I та III контурами - $R_{13}=R_5$, між II та III контурами - $R_{23}=R_4$; а алгебраїчну суму ЕРС, які входять до I контуру, позначити $E_{11}=E_1-E_2$ (при збіганні напрямку контурного струму та ЕРС перед ЕРС буде знак «+», при не збіганні - «-»), до II контуру - $E_{22}=E_2$, до III контуру, позначити $E_{33}=E_6$, то система рівнянь буде мати вигляд:

$$\text{I: } I_{11} \times R_{11} - I_{22} \times R_{12} - I_{33} \times R_{13} = E_{11}$$

$$\text{II: } -I_{11} \times R_{12} + I_{22} \times R_{22} - I_{33} \times R_{23} = E_{22}$$

$$\text{III: } -I_{11} \times R_{13} - I_{22} \times R_{23} + I_{33} \times R_{33} = E_{33}$$

Далі вирішують рівняння відносно контурних струмів, а потім визначають струми у вітках за контурними струмами.

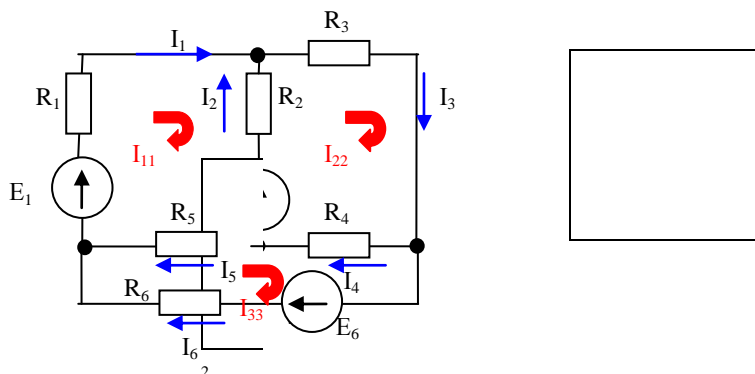


Рисунок 12.4 - Схема електричного кола для визначення струмів методом контурних струмів

Коли контур має джерело струму, то контурний струм цього контура та струм у вітці, в яку ввімкнено джерело струму, дорівнює струму джерела. Таким чином, визначати ці струми не потрібно й не потрібно складати рівняння для цього контуру. Наприклад, у вітку 3 приведеної схеми ввімкнемо джерело струму зі струмом I , тоді $I_3 = I_{22} = I$ та складають рівняння за II законом Кірхгофа лише для I й III контурів.

Приклад: визначити струми в усіх вітках електричного кола, вказаного на рисунку 12.5, методом контурних струмів при $E_1 = 100\text{В}$, $E_2 = 30\text{В}$, $R = 100\text{Ом}$, $I = 1\text{А}$

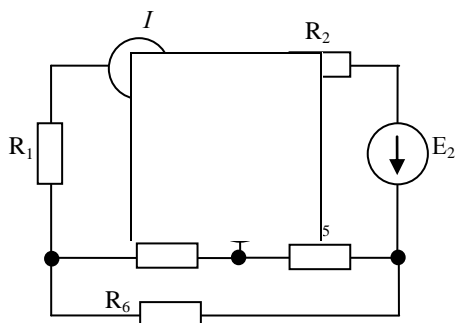


Рисунок 12.5 - Вихідна схема електричного кола

Розв'язання

- 1 Обираємо напрямок контурних струмів та струмів у кожній вітці (рис.12.6).
- 2 Так як у вітці 1 ввімкнено джерело струму, то $I_1 = I_{11} = I = 1A$ й не потрібно складати рівняння за II законом Кірхгофа для I контуру.

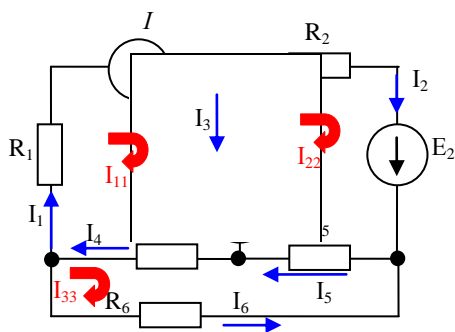


Рисунок 12.6- Вихідна схема електричного кола з напрямками струмів

- 3 Згідно принципу методу контурних струмів струми віток єдиним чином визначаються контурним струмом, тобто:

$$I_2 = I_{22}$$

$$I_3 = I_{11} - I_{22}$$

$$I_4 = I_{11} - I_{33}$$

$$I_5 = I_{22} - I_{33}$$

$$I_6 = -I_{33}$$

- 4 Складаємо рівняння за II законом Кірхгофа для II та III контуру:

$$\text{II: } I_2 \times R_2 - I_3 \times R_3 + I_5 \times R_5 = -E_1 + E_2$$

$$\text{III: } -I_4 \times R_4 - I_5 \times R_5 - I_6 \times R_6 = 0$$

- 5 Замість струмів віток підставляємо вирази контурних струмів:

$$\text{II: } I_{22} \times R_2 - (I_{11} - I_{22}) \times R_3 + (I_{22} - I_{33}) \times R_5 = -E_1 + E_2$$

$$\text{III: } -(I_{11} - I_{33}) \times R_4 - (I_{22} - I_{33}) \times R_5 - (-I_{33}) \times R_6 = 0$$

Після перетворення рівнянь отримаємо:

$$\text{II: } I_{22} \times (R_2 + R_3 + R_5) - I_{11} \times R_3 = -E_1 + E_2 + I_{11} \times R_3$$

$$\text{III: } -I_{22} \times R_5 + I_{33} \times (R_4 + R_5 + R_6) = I_{11} \times R_4$$

Перевірка збігається: знак «+» за діагоналлю для рівнянь (для I_{22} у II контурі, для I_{33} у III контурі) й знак «-» для інших членів з лівого боку рівняння при однаково обраних напрямках контурних струмів.

6 Підставляємо значення відомих величин:

$$\text{II: } 30I_{22} - 10I_{33} = -100 + 30 + 10 = -60$$

$$\text{III: } -10I_{22} + 30I_{33} = 10$$

Вирішуємо рівняння відносно I_{22} та I_{33} : $I_{33} = -\frac{3}{8} = -0,38A$

$$I_{22} = 3 \times (-0,38) - 1 = -1,14 - 1 = -2,14A$$

7 Знаючи контурні струми визначаємо струми у вітках кола:

$$I_2 = I_{22} = -2,14A$$

$$I_3 = I_{11} - I_{22} = 1 - (-2,14) = 3,14A$$

$$I_4 = I_{11} - I_{33} = 1 - (-0,38) = 1,38A$$

$$I_5 = I_{22} - I_{33} = -2,14 - (-0,38) = -1,76A$$

$$I_6 = -I_{33} = -(-0,38) = 0,38A$$

Струми I_2 та I_5 одержали зі знаком «-», тобто їх напрямок обрано не вірно й його потрібно змінити.

8 Перевірка за I законом Кірхгофа:

$$I + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_3 - I_5 - I_4 = 0$$

$$I_5 + I_6 - I_2 = 0$$

$$1 + 2,14 - 3,14 = 0$$

$$3,14 - 1,76 - 1,38 = 0$$

$$1,76 + 0,38 - 2,14 = 0$$

Перевірка збігається.

12.3 Розрахунок складних електричних кіл методом вузлової напруги

У випадку, коли в електричне коло ввімкнено два й більше джерел живлення, для розрахунку електричного кола можна використовувати метод вузлової напруги (чи вузлових потенціалів). Вузловий потенціал - це потенціал вузла. Вузова напруга - це напруга між двома вузлами кола. Принцип цього методу: потрібно визначити потенціали окремих точок електричного кола. Для визначення потенціалів окремих точок електричного кола потенціал точки, яка з'єднана з землею, приймається рівним нулю. А потім струми визначаються за законом Ома та формулою, за якою знаходиться напруга на зажимах джерела живлення:

$$U = \varphi_+ - \varphi_- = I \times R,$$

$$U = \varphi_+ - \varphi_- = E \pm I \times r_0,$$

де «+» - якщо джерело працює як споживач,

«-» - якщо джерело працює як генератор.

Слід пам'ятати, що струм в опорах виникає під дією електричних сил й добуточно направлений від точки з більш високим потенціалом до точки з меншим потенціалом.

Приклад: визначити струми в усіх вітках електричного кола, вказаного на рисунку 12.7, методом вузлової напруги.

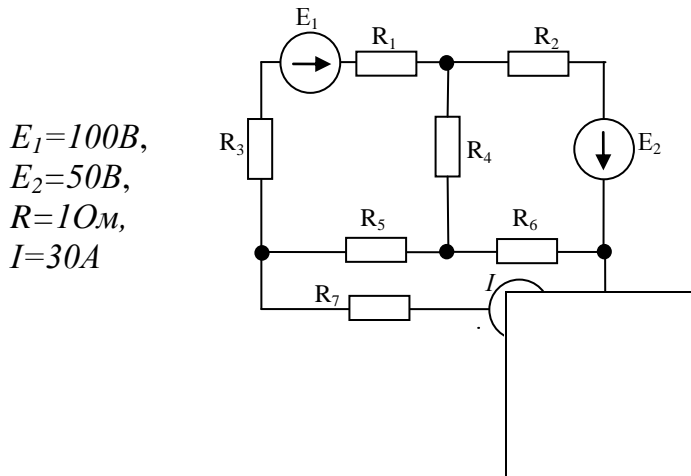


Рисунок 12.7 - Вихідна схема електричного кола

Розв'язання

- 1 Проставимо нумерацію вузлів. Вузол 2 заземлимо, тобто $\varphi_2=0$. Проставимо напрямки струмів у вітках з урахуванням добуточного напрямку струму (рис.12.8).

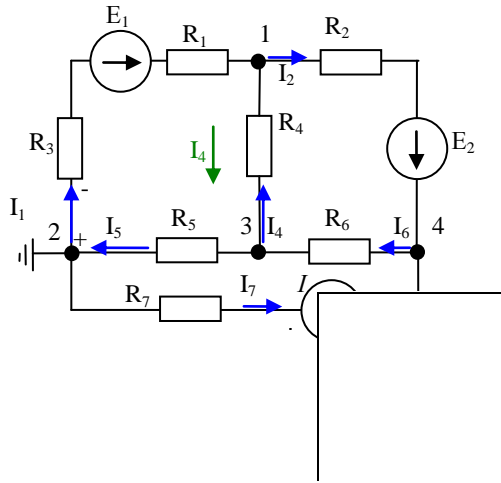


Рисунок 12.8- Вихідна схема електричного кола з напрямками струмів

- 2 Так як у вітку 7 ввімкнено джерело струму, то $I_7 = I = 30A$
- 3 Складаємо рівняння згідно закону Ома та формулою, за якою знаходиться напруга на зажимах джерела живлення:

$$I_1 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_1}{R_1 + R_3} = \frac{-\varphi_1 + E_1}{R_1 + R_3}, \text{ т.як } \varphi_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_4 + E_2}{R_2}$$

$$I_4 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{R_4}$$

$$I_5 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{R_5} = \frac{\varphi_3}{R_5}$$

$$I_6 = \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_6}$$

- 4 Складаємо рівняння за I законом Кірхгофа для усіх складних вузлів кола, крім заземленого:
 - 1: $I_1 - I_2 + I_4 = 0$
 - 3: $-I_5 - I_4 + I_6 = 0$
 - 4: $I_2 + I_7 - I_6 = 0$
- 5 Підставляє ва вирази струмів у рівняння, складенні за I законом Кірхгофа:

$$1: \frac{-\varphi_1 + E_1}{R_1 + R_3} - \frac{\varphi_1 - \varphi_4 + E_2}{R_2} + \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{R_4} = 0$$

$$3: -\frac{\varphi_3}{R_5} - \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{R_4} + \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_6} = 0$$

$$4: \frac{\varphi_1 - \varphi_4 + E_2}{R_2} + I_7 - \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_6} = 0$$

Приведемо подібні члени та підставляємо значення відомих величин:

$$1: \varphi_1 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} \right) - \frac{\varphi_4}{1} - \frac{\varphi_3}{1} = \frac{100}{2} - \frac{50}{1} \quad \Rightarrow 2,5\varphi_1 - \varphi_3 - \varphi_4 = 0$$

$$3: -\frac{\varphi_1}{1} + \varphi_3 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} \right) - \frac{\varphi_4}{1} = 0 \quad \Rightarrow -\varphi_1 + 3\varphi_3 - \varphi_4 = 0$$

$$4: -\frac{\varphi_1}{1} - \frac{\varphi_3}{1} + \varphi_4 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{1} \right) = 30 + \frac{50}{1} \quad \Rightarrow -\varphi_1 - \varphi_3 + 2\varphi_4 = 80$$

6 Для вирішення отриманої системи рівнянь складемо визначник з коефіцієнтів при невідомих потенціалах точок й вирішимо його за правилом Крамера:

$$\begin{vmatrix} -\varphi_1 & -\varphi_3 & -\varphi_4 & | & \\ 2,5 & -1 & -1 & | & 0 \\ -1 & 3 & -1 & | & 0 \\ -1 & -1 & 2 & | & 80 \end{vmatrix}$$

$$\varphi_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{320}{5,5} = 58,2B$$

$$\varphi_3 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{280}{5,5} = 50,9B$$

$$\varphi_4 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{520}{5,5} = 94,5B$$

7 Визначаємо струми у вітках:

$$I_1 = I_3 = \frac{-\varphi_1 + E_1}{R_1 + R_3} = \frac{100 - 58,2}{1 + 1} = 20,9A$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_4 + E_2}{R_2} = \frac{58,2 - 94,5 + 50}{1} = 13,7A$$

$$I_4 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{R_4} = \frac{50,9 - 58,2}{1} = -7,3A$$

$$I_5 = \frac{\varphi_3}{R_5} = \frac{50,9}{1} = 50,9A$$

$$I_6 = \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_6} = \frac{94,5 - 50,9}{1} = 43,6A$$

Струм I_4 одержали зі знаком «-», тобто його напрямок обрано не вірно й його потрібно змінити.

8 Перевірка за I законом Кірхгофа:

$$1: I_1 - I_2 - I_4 = 0$$

$$20,9 - 13,7 - 7,3 = 0$$

$$0,1 \approx 0$$

$$3: -I_5 + I_4 + I_6 = 0$$

$$-50,9 + 7,3 + 43,6 = 0$$

$$0 = 0$$

$$4: I_2 + I_7 - I_6 = 0$$

$$13,7 + 30 - 43,6 = 0$$

$$0,1 \approx 0$$

Перевірка збігається.

12.4 Розрахунок складних електричних кіл методом еквівалентного генератора

12.4.1 Теорема об еквівалентном генераторі

Активним двополюсником називають електричне коло, яке має хоч одно джерело енергії та два вихода (затискач). Позначається прямокутником з буквою «А» усередині. Пасивним двополюсником називають ділянку електричного кола, яка має два вихода й не має джерел енергії. Позначається прямокутником. Теорема: усякий активний лінійний двополюсник можна замінити еквівалентним генератором, який складається з еквівалентної ЕРС (E_0) та еквівалентного опору (r_0), де еквівалентна ЕРС дорівнює напрузі ХХ двополюсника, а еквівалентний опір - вхідному опору з боку зажимів розглядаемого двополюсника.

ХХ - це розрив зовнішнього кола двополюсника. При цьому струм у колі дорівнює нулю, внутрішнє падіння напруги відсутнє й напруга на зажимах двополюсника дорівнює еквівалентній ЕРС (E_0). Дослідним шляхом напругу на зажимах двополюсника можна виміряти вольтметром. Вхідний опір з боку зажимів двополюсника легше всього знайти використовуючи дослід КЗ (це замкнення зовнішнього кола через малий опір, наприклад, амперметр). При цьому струм у колі різко збільшується, а напруга зменшується згідно закону

Ома. За допомогою амперметра вимірюють струм КЗ (I_{K3}) й за наступною формулою визначають вхідний опір з боку зажимів двополюсника:

$$R_0 = \frac{E_0}{I_{K3}}$$

Значення еквівалентної ЕРС та еквівалентного опору можна також знайти розрахунковим шляхом. Для визначення E_0 приймають опір у вітці, для якої потрібно знайти струм, рівним ∞ й визначають напругу між точками, до яких приєднаний цей опір. Для визначення r_0 припускають, що усі ЕРС у колі двополюсника дорівнюють нулю, й при відключеному опорі у вітці, для якої потрібно знайти струм, визначають загальний опір відносно зажимів двополюсника.

12.4.2 Метод еквівалентного генератора

Визначення струму на одній ділянці електричного кола можна виконати методом еквівалентного генератора, який дозволяє спростити такі обчислювання як вирішення систем рівняння з багатьма невідомими при використанні методів контурних струмів, вузлової напруги та накладання.

Принцип цього метода:

- 1 Задане електричне коло розбивають на дві ділянки: на гілку з опором, в якій потрібно знайти струм, та на частину кола яка залишилася після вилучення цієї гілки, тобто двополюсник.
- 2 Потім визначають еквівалентну ЕРС (E_0) та еквівалентний опір (r_0) двополюсника за допомогою дослідів холостого ходу та короткого замкнення.

- 3 Визначають струм у гілці за формулою:
$$I = \frac{E_0}{R + r_0},$$

де R - опір вітки, в якій потрібно було знайти струм, O_m

Приклад: визначити струм в опорі 5 електричного кола, вказаного на рис.12.9, методом еквівалентного генератора.

$E=100В,$
 усі $R=100\Omega,$
 окрім $R_3=400\Omega$

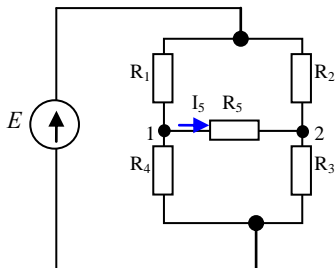


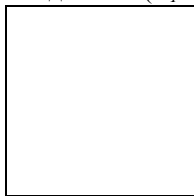
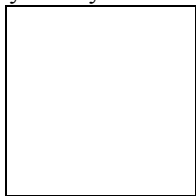
Рисунок 12.9- Вихідна схема електричного кола

Розв'язання

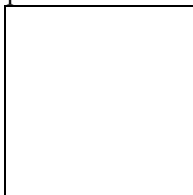
- 1 Електричне коло розбиваємо на дві ділянки: на вітку з опором 5 та двополюсник, який перетворюємо в еквівалентний генератор з еквівалентною ЕРС (E_0) та еквівалентним опором (r_0).
 - 2 З досліді холостого ходу визначаємо еквівалентну ЕРС. Для цього вітку з опором 5 обриваємо - рис.15.2.
- За II законом Кірхгофа складаємо рівняння для обраного контура:

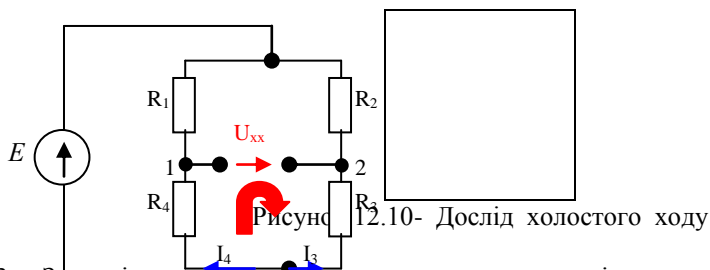
$$U_{xx} - I_3 \times R_3 + I_4 \times R_4 = 0$$

Де при паралельному сполученні послідовно з'єднаних (R_1 та R_4) й (R_2 та R_3):

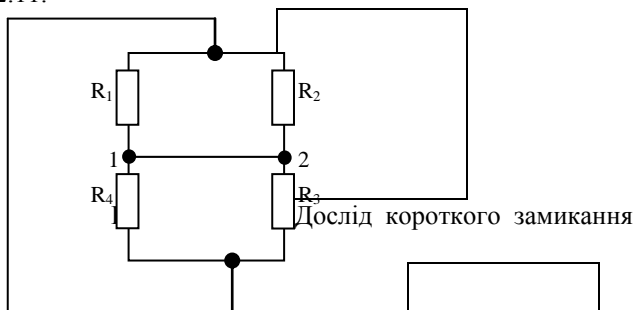


Підставимо знайденні струми у рівняння:





- 3 З дослідження короткого замикання визначимо еквівалентний опір. Для цього вітку з опором 5 та усі вітки з джерелом ЕРС потрібно замкнути - рис.12.11.



Так як R_2 та R_1 з'єднанні паралельно, то

Так як R_3 та R_4 з'єднанні паралельно, то

Так як R_{12} та R_{34} з'єднанні послідовно, то

- 4 Визначаємо струм у опорі 5:

13 Магнітне поле

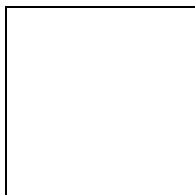
13.1 Магнітне поле електричного струму. Правило свердлика

Магнітне поле - це особлива форма матерії, яка породжується рухомими зарядами чи струмами й проявляється під їх дією силовим діянням. Струм у проводі й магнітне поле навколо нього - нерозривно пов'язані явища. Характер взаємодії струмів залежить від форми провідника, відстані між провідниками й напрямку струму в них. Два провідника притягуються один до одного, якщо струми, які протікають по ним, мають однаковий напрямок, й відштовхуються у випадку протилежного напрямку струмів у провідниках.

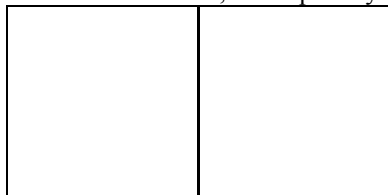
Магнітне поле виникає як усередині так й зовні провідників зі струмом, при русі усяких заряджених часток чи тіл, при зміні електричного поля. Так як магнітне поле є матерією, то воно володіє енергією. Під дією сил поля провід зі струмом може переміщуватися, тоді виконується робота за рахунок енергії магнітного поля. Енергія магнітного поля безперервно розподілена у просторі. Дія струму на струм відбувається не миттєво. Поле передає взаємодію з дуже великою, але цілком з певною швидкістю, яка складає приблизно 300 000 км/с. Магнітне поле провідника зі струмом простирається до нескінченості. Але магнітні сили дуже швидко зменшуються зі збільшенням відстані. Тому на практиці дію магнітних сил поля можна виявити лише на невеликих відстанях від провідника зі струмом.

Графічно магнітне поле зображується силовими лініями, які проводяться так, щоб напрямок дотичної у кожній її точці збігався з напрямком поля. Магнітні лінії (чи лінії магнітного потоку) є замкнені. Силкові лінії магнітного поля прямолінійного струму є концентричними колами з центрами на вісі провідника й знаходяться у площині, перпендикулярній до вісі провідника. Якщо змінити напрямок струму у провіднику, то форма силових ліній не зміниться, але зміниться їх напрямок на протилежний.

Напрямок магнітних ліній проводу зі струмом можна визначити за правилом свердлика: якщо поступовий рух свердлика сумістити з напрямком струму у проводі, то напрямок обертання рукоятки свердлика вкаже напрямок магнітних ліній.



У випадку витка чи котушки зі струмом правило свердлика використовують у зміненому вигляді: коли сумістити напрямок обертання рукоятки свердлика з напрямком струму у витку чи котушці, то поступовий рух свердлика вкаже напрямок магнітних ліній, які пронизують поверхню обмежену контуром



струму.

13.2 Індукція магнітного поля

Сила, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі залежить не тільки від струму, а й від інтенсивності дії магнітного поля. Інтенсивність дії магнітного поля у даній точці характеризується магнітною індукцією, яка позначається - B , Тл (тесла - в ім'я югославського фізика Тесла). Магнітна індукція - це векторна величина, напрямок якої збігається з напрямком магнітних ліній. У кожній точці поля вектор магнітної індукції направлений уздовж дотичної до магнітної лінії. Тобто, напрямок індукції визначають за правилом свердлика (чи годинникової стрілки). У магнітів магнітна індукція направлена від північного полюсу до південного. Магнітна індукція - це силова характеристика магнітного поля. Магнітне поле, в усіх точках якого вектори магнітної індукції однакові за напрямком та величиною, називають однорідним. Таке магнітне поле можна отримати між паралельними та близько розміщеними полюсами магніту чи усередині довгої котушки зі струмом. Графічно однорідне магнітне поле зображується паралельними магнітними лініями, проведеними з однаковою щільністю (рис.1.1).

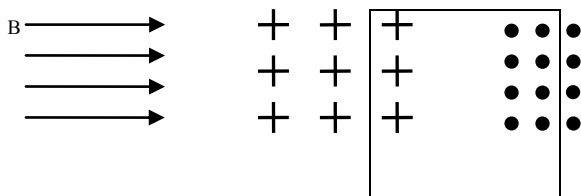


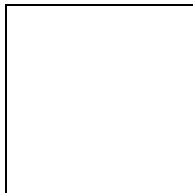
Рисунок 13.1 - Графічне зображення однорідного магнітного поля

Для лінійних середовищ магнітне поле підкоряється принципу суперпозиції (чи принципу накладання), тобто магнітне поле утворене кількома струмами дорівнює векторній сумі магнітних полів, утворених кожним струмом окремо.

13.3 Магнітна проникність

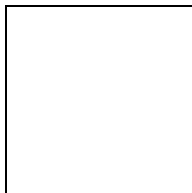
Для отримання уявлення о магнітних властивостях середовища порівняли магнітні поля проводів зі струмом в різних середовищах та в вакуумі. При цьому встановили, що в одному випадку поле більш інтенсивне ніж в вакуумі, а в іншому - навпаки. Це пояснюється різними магнітними властивостями середовищ та речовин, які оточують провід зі струмом. Речовини, в яких утворене магнітне поле сильніше ніж в вакуумі, називають парамагнітними. Речовини, в яких утворене магнітне поле слабше ніж в вакуумі, називають діамагнітними. Величину, яка характеризує магнітні властивості середовища, в якому виникає магнітне поле, назвали абсолютною магнітною проникністю

середовища та позначили - μ_a . Вимірюється в

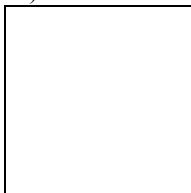


Абсолютні магнітні проникності речовин зручно порівнювати з магнітною сталою. Магнітною сталою називають абсолютну магнітну проникність вакууму. Розмірність та числове значення цієї величини лише залежить від вибору системи одиниць вимірювання і не залежить від властивостей

середовища. В системі СІ вона буде:

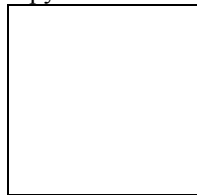


Відношення абсолютної магнітної проникності будь-якої речовини до магнітної постійної називається магнітною проникністю цієї речовини (чи відносною магнітною проникністю):



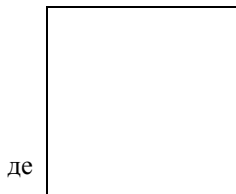
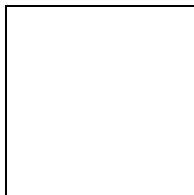
Це величина характеризує магнітне середовище, вона безмірна, залежить лише від властивостей середовища і не залежить від вибору системи одиниць вимірювання. Вона показує у скільки раз сила взаємодії між провідниками зі

струмами більше у даній речовині ніж у вакуумі. Для вакууму



$\mu = 1$. В залежності від речовини магнітна проникність може бути більша або менша за 1. Для технічних розрахунків магнітні проникності діамagnetиків та парамагнетиків приймають рівним 1.

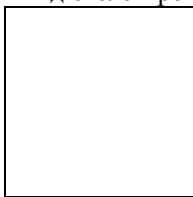
Ще у 19 столітті теоретично й дослідно було визначено зв'язок між електричною та магнітною сталими:



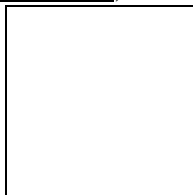
де c - швидкість світла у вакуумі.

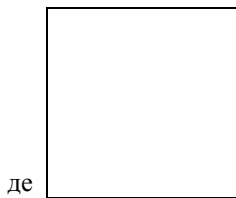
13.4 Правило лівої руки

Під дією магнітного поля провідник зі струмом починає рухатися. Вважають, що на провідник діє електромагнітна сила магнітного поля (чи сила

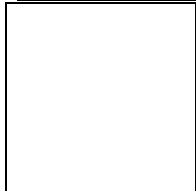


Ампера). Позначається - F , H .



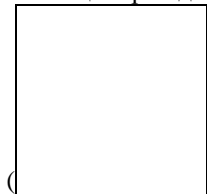


де l - довжина провідника (активна), м

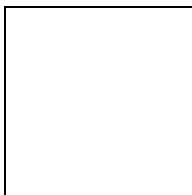


α - кут між провідником зі струмом та магнітними лініями.

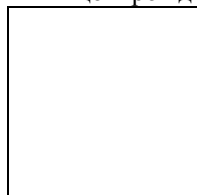
Якщо провідник розміщений перпендикулярно магнітним лініям



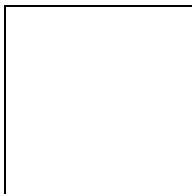
($\alpha = 90^\circ$):



Якщо провідник розміщений уздовж магнітних ліній, тобто



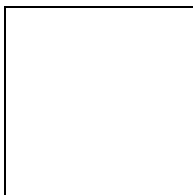
($\alpha = 0^\circ$), то:



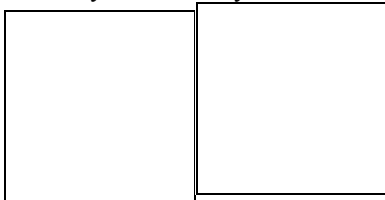
Напрямок руху провідника під дією магнітного поля збігається з напрямком електромагнітної сили. Зв'язок між напрямком струму, напрямком магнітного поля та напрямком руху провідника (чи електромагнітної сили) встановлює правило лівої руки: якщо розмістити долоню лівої руки так, щоб вектор магнітної індукції входив в неї, а витягнуті чотири пальця збігалися з

напрямок струму, то відігнутий великий палець вкаже напрямок руху провідника (чи електромагнітної сили).

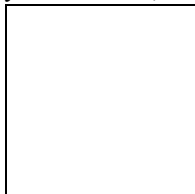
Для визначення напрямку сили, яка діє на електрон у магнітному полі, напрямок струму приймають протилежний напрямку руху (вектору швидкості) електрона, у позитрона - навпаки (напрямки струму і вектора швидкості збігаються):



Якщо заряджена частка не рухається у магнітному полі чи переміщається



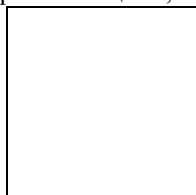
уздовж поля, то



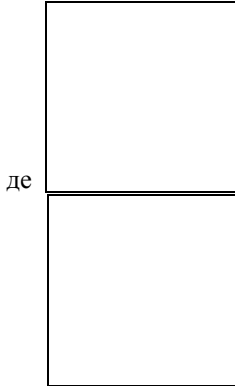
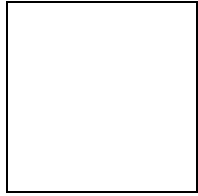
14 Характеристики магнітного поля

14.1 Магнітний потік

Кількість силових магнітних ліній, які проходять скрізь поверхню провідника, характеризує потік магнітного поля. Магнітний потік однорідного поля - це векторна величина, яка чисельно дорівнює добутку магнітної індукції й поверхні площини, перпендикулярної до вектора цієї індукції.



Позначається - Φ , Вб.



де

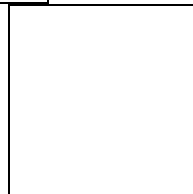
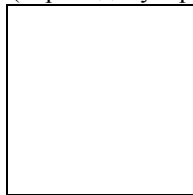
- магнітна індукція, $Tл$

індукції, $м^2$

- площа поверхні, перпендикулярної до вектора цієї

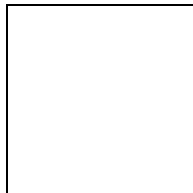
Одиниця вимірювання магнітного потоку названа в ім'я німецького фізика Вебера.

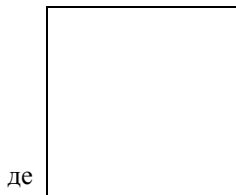
Якщо вектор індукції не перпендикулярний площі (неоднорідне магнітне поле), то визначають нормальну (перпендикулярну) складову цього вектора (B_H):



Нормальна складова вектора індукції:

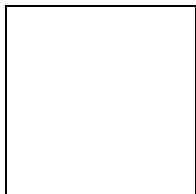
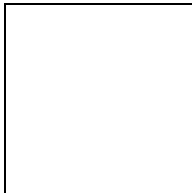
Таким чином, для неоднорідного поля:





де - кут між вектором індукції та нормаллю.

Робота, яка виконується провідником зі струмом при пересіченні їм магнітного потоку, чисельно дорівнює добутку магнітного потоку й сили струму. Позначається - A , Дж.

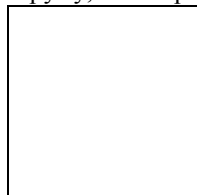


За допомогою магнітних ліній зображують не лише магнітне поле й величину магнітної індукції, а й величину магнітного потоку.

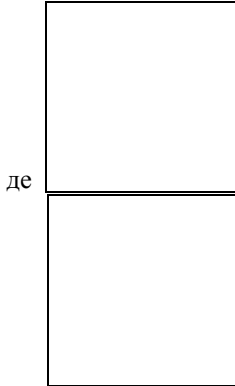
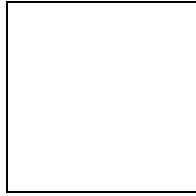
Сумарний магнітний потік скрізь замкнену поверхню дорівнює нулю, так як магнітні лінії замкнені, тобто кожна магнітна лінія, яка входить у замкнену поверхню, повинна з неї вийти. Таким чином, магнітний потік, який входить у замкнену поверхню, дорівнює магнітному потоку, який виходить з неї.

14.2 Вектори намагніченості та напруженості

Замкнений електричний струм в елементарному контурі (тобто у контурі дуже малих розмірів при порівнянні з відстанями до точок, в яких визначається магнітне поле) називається магнітним диполем, який характеризується магнітним моментом. Магнітний момент - це векторна величина, яка дорівнює добутку струму на площину обмежену контуром цього струму, й направлена перпендикулярно до цієї площини. Позначається -



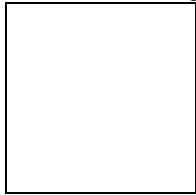
, $A \cdot m^2$



де струм, A

- площа, обмежена контуром струму, m^2

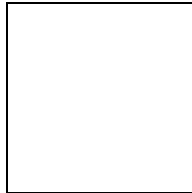
Геометрична сума моментів усіх диполів у матеріалі (наприклад, молекулярні струми в речовині) дає магнітний момент матеріалу - M , Am^2

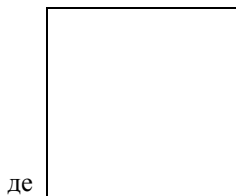


де - n - кількість диполів у матеріалі.

Величину, яка чисельно дорівнює відношенню магнітного моменту тіла до

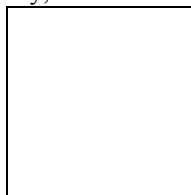
його об'єму, називають намагніченістю тіла -



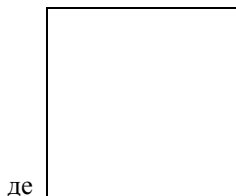
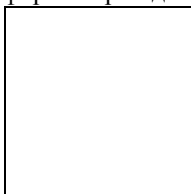


де - об'єм тіла, m^3

Разом з магнітною індукцією для характеристики магнітного поля використовують допоміжну розрахункову величину, яка називається



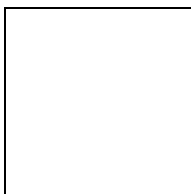
напруженістю магнітного поля. Позначається - . Вона визначає залежність магнітного поля від форми провідника та сили струму.



де - відстань від провідника зі струмом до точки, в якій визначають

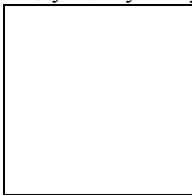
напруженість, m

Напруженість - це векторна величина, напрямком якої збігається з напрямком вектора магнітної індукції у середовищі з однаковими магнітними властивостями у всіх напрямках. В однорідному середовищі напрямок напруженості збігається з напрямком магнітної лінії у даній точці. Зв'язок між напруженістю магнітного поля та його магнітною індукцією встановлює формула:



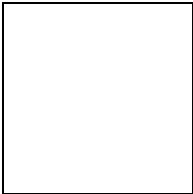
Напруженість поля потрібно знати при розрахунках магнітних кіл електричних машин, електромагнітних апаратів й всюди, де лінії магнітної

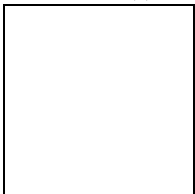
індукції проходять у матеріалах з різними магнітними проникностями. Напруженість поля в точках, розміщених на контурі, в загальному випадку має різне значення. Напруженість та індукція у вакуумі:



14.3 МРС та магнітна напруга. Закон повного струму

Аналогічно електричній напрузі при розрахунках магнітного поля

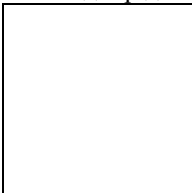
використовується поняття магнітної напруги - . Магнітна напруга між двома точками магнітної лінії в однорідному полі дорівнює добутку напруженості магнітного поля на ділянку довжини магнітної лінії:

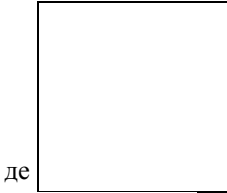
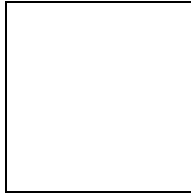


де  - довжина магнітної лінії між двома точками, для яких визначають

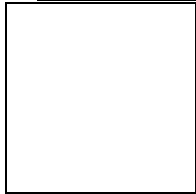
напругу, U

Магнітна напруга між двома точками однорідного поля, розміщеними не на

одній магнітній лінії й на відстані  друг від друга:

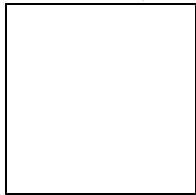


де  - проекція вектора напруженості на відрізок

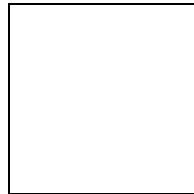


На відміну від електричної напруги магнітна залежить від обраного шляху між початковою та кінцевою точками. Магнітна напруга, яка визначена за замкненим контуром, називається намагнічуючою силою чи магніторушійною силою (МРС).

МРС - це властивість струму породжувати магнітне поле. Позначається -

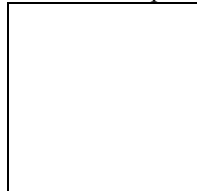


 МРС проводу зі струмом чисельно дорівнює силі струму,



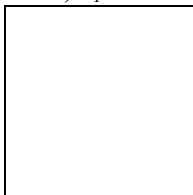
який породжує магнітне поле:

МРС контуру чи котушки зі струмом з кількістю витків чисельно дорівнює добутку сили струму на кількість витків:



МРС у симетричних полях (наприклад, кільцева котушка) рівномірно розміщується уздовж магнітної лінії. Частку МРС, яка приходить на одиницю довжини магнітної лінії, характеризує напруженість магнітного поля.

Залежність між напруженістю магнітного поля та струмом встановлює закон повного струму. Повним струмом називають алгебраїчну суму струмів, які пронизують поверхню обмежену замкненим контуром. Наприклад, розглянемо контур, проведений в магнітному полі, поверхня якого пронизується двома струмами (рис.14.1). Обираємо напрямок обходу контуру. Будемо вважати напрямок струму позитивним, якщо його напрямок збігається з поступальним рухом свердлика, рукоятка якого обертається в напрямку обходу контуру, й негативним, коли не збігається. Тобто, I_1 - позитивний, I_2 - негативний.

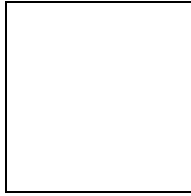


Повний струм буде:

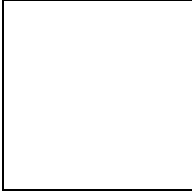


Рисунок 14.1 - Контур, проведений в магнітному полі, поверхня якого пронизується двома струмами

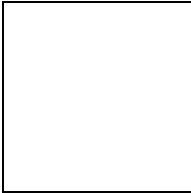
Закон повного струму: МРС уздовж контуру дорівнює повному струму, який пронизує поверхню обмежену цим контуром:



де n - кількість струмів, які пронизують поверхню обмежену контуром,



- напруженість магнітного поля контуру, A/m



- довжина замкненого контуру, m

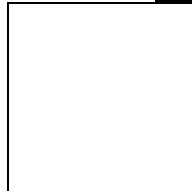
15 Магнітне поле провідника зі струмом та котушки

15.1 Магнітне поле провідника зі струмом

Напруженість магнітного поля усередині прямолінійного проводу зі струмом

у точці, яка знаходиться від вісі проводу на відстані  меншою

за радіус проводу r :



Таким чином, напруженість магнітного поля у всякій точці усередині прямолінійного проводу зі струмом пропорційна відстані до цієї точки від вісі

проводу. Тобто, у центрі (при $r=0$) $H=0$ та $B=0$. А напруженість

на поверхні проводу (при $r=a$):

буде найбільша для цього магнітного поля (де a - діаметр проводу, мм).

Напруженість магнітного поля навколо прямолінійного проводу зі струмом у I А, який тече перпендикулярно до площини рисунку, змінюється за законом Біо-Савара-Лапласа. Напруженість у точці, яка знаходиться від осі проводу на відстані r більшою за радіус проводу:

Графік зміни напруженості магнітного поля усередині та поза проводу вказаний на рисунку 15.1.

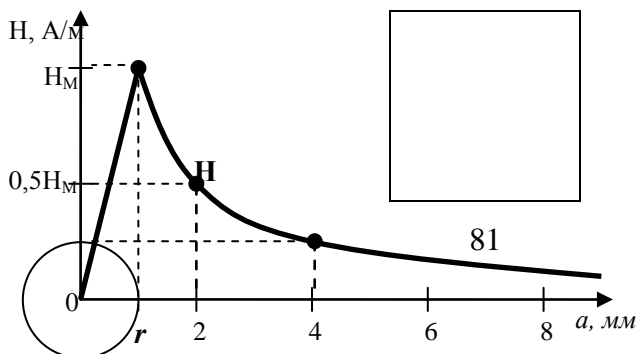


Рисунок 15.1 - Графік зміни напруженості магнітного поля усередині та поза проводу

Помножив значення отриманої напруженості поля на абсолютну магнітну

проникність, визначимо магнітну індукцію за формулою:

Індукцію у всякій точці магнітного поля струмів, які протікають по двом проводам, визначають за геометричною сумою векторів магнітної індукції у

цій точці:

В цьому випадку магнітне поле уявляють як результат накладення магнітних полів у першому та другому проводах. Поле паралельних проводів з однаково направленими струмами вказано на рис.15.2(1) та поле протилежно направлених струмів - на рис.15.2(2).

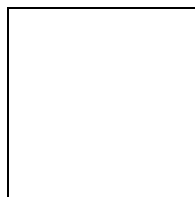
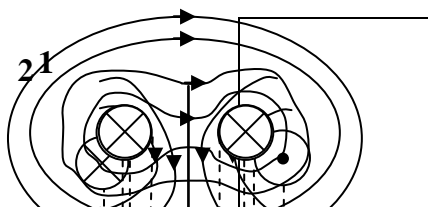
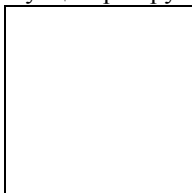
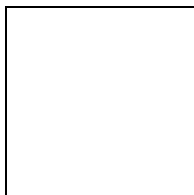


Рисунок 15.2 - Поле паралельних проводів з однаково направленими струмами (1) та поле протилежно направлених струмів (2)

15.2 Магнітне поле котушки

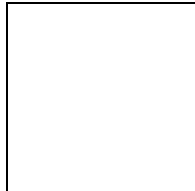
Напруженість магнітного поля у центрі кругового провідника зі струмом:





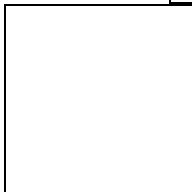
де d - діаметр витка котушки, м

Напруженість магнітного поля у точці, віддаленої від площини контуру

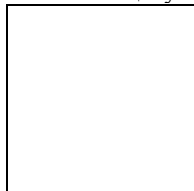


кругового провідника зі струмом на відстані

:

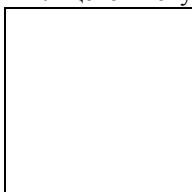


Розглянемо кільцеву котушку (рис.3.3). Напруженість поля у точці на



відстані

від вісі кільцевої котушки з кількістю витків N буде:

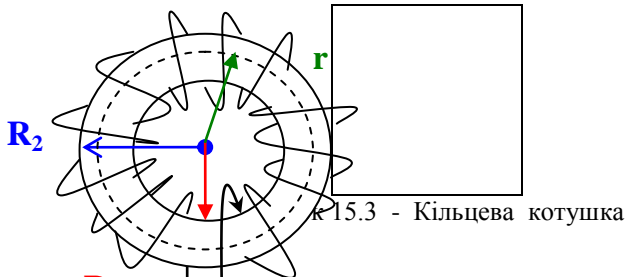


Так як алгебраїчна сума струмів скрізь поверхню, обмежену контуром, радіус якого менше за R_1 та більше за R_2 , дорівнює 0, то напруженість та магнітна індукція поза кільцевої котушки будуть дорівнювати нулю.

Якщо , то . При чому найбільше значення

напруженості поля буде на внутрішній поверхні кільця ()

найменше - на зовнішній (). Чим менше різниця між R_1 та R_2 , тим ближче по значенню H_{max} та H_{min} . Помножив значення отриманої напруженості поля на абсолютну магнітну проникність, визначимо магнітну індукцію за формулою:



16 Електромагнітна індукція

16.1 Явище електромагнітної індукції

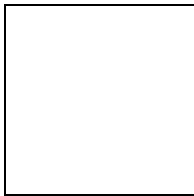
У 1820 році датський фізик Енрік Оерст виявив магнітну дію струму. Під дією магнітного поля струму магнітна стрілка відхилялася від своєї позиції рівноваги. Англійський фізик Майкл Фарадей, ознайомившись з цим відкриттям, прийшов до висновку: якщо струм, який йде по замкненому провіднику, викликає рух магніту, то й навпаки, рух магніту повинен викликати струм у замкненому провіднику. Вірність цього висновку було доведено у 1831 році Майклом Фарадеєм експериментальним шляхом. Він встановив, що у всякому замкненому провіднику виникає електричний струм лише при зміні потоку магнітної індукції крізь площину, обмежену цим провідником, й існує увесь час зміни потоку. Струм, який виникає у замкненому провіднику, під дією рухомого магнітного поля називається індукованим (що у переводі з грецької - наведений), а явище отримання індукованого струму - явищем електромагнітної індукції. Таким чином, умови виникнення індукованого струму: замкнений провідник й зміна магнітного потоку. Величина цього струму в тій чи іншій ступені залежить від опору провідника.

16.2 ЕРС електромагнітної індукції

В замкненому контурі струм виникає під дією зовнішньої неелектричної сили. Робота цієї сили по переміщенню одиничного електричного заряду характеризується ЕРС. Тобто, щоб виник струм потрібно мати ЕРС.

ЕРС індукції може виникнути і в незамкненому провіднику, але струму не буде. Величина цієї ЕРС ні як не залежить від опору провідника й дорівнює напрузі між кінцями провідника:





- напруженість електричного поля зарядів, які накопичуються на кінцях провідника, B/m

Таким чином, виникнення ЕРС індукції та індукованого струму пов'язано зі зміною магнітного потоку у контурі провіднику. Коли в постійному магнітному полі знаходиться нерухомий металевий провідник, то ЕРС індукції виникнути не може, так як магнітний потік у контурі провідника залишається незмінним. Фізична сутність цього явища - в металах є вільні електрони, які рухаються довільно. На кожний вільний електрон діє електромагнітна сила, напрямком якої залежить від напрямку вектора зовнішнього магнітного поля й напрямку вектора швидкості електрона в кожний момент. Дія магнітного поля на електрони при довільному їх русі різна по напрямку, тому розділення зарядів у провіднику не відбувається й ЕРС індукції у нерухомому провіднику виникнути не може.

Виникає ЕРС індукції при русі провідника у магнітному полі. Нехай незамкнений провідник рухається в однорідному магнітному полі паралельно самому собі у напрямку, перпендикулярному силовим лініям поля, зі швидкістю v (рис.16.1).

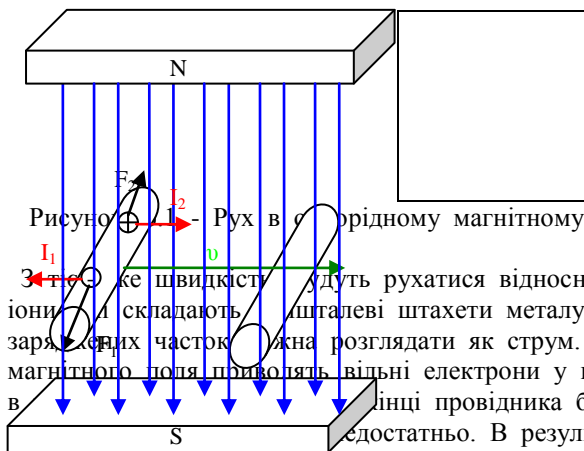
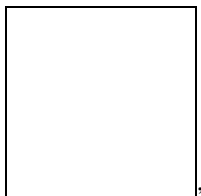
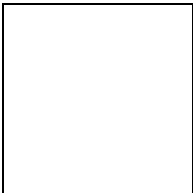


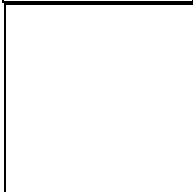
Рисунок 16.1 - Рух в однорідному магнітному полі незамкненого провідника

Згідно з формулою швидкості v будуть рухатися відносно магнітного поля позитивні йоні й складають металеві шхати металу, й вільні електроні. Рух цих заряджених часток можна розглядати як струм. Таким чином, зовнішні сили магнітного поля призводять вільні електроні у наведений рух по провіднику, в кінці провідника буде надлишок електронів, на іншому кінці - недостатньо. В результаті в провіднику виникає електричне поле. Сили цього поля та електромагнітні сили наведені в різні сторони. Тому розділення зарядів в провіднику відбувається доки електромагнітні сили не зрівноважаться силами електричного поля. Це створює різницю потенціалів на кінцях провідника й виникає ЕРС індукції. З дослідів встановлено, що ЕРС індукції залежить від величини магнітної індукції,

швидкості переміщення, активної довжини провідника та кута між провідником і силовими лініями:



де  - швидкість переміщення провідника у магнітному полі, m/s

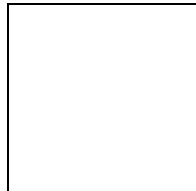


- довжина провідника, m

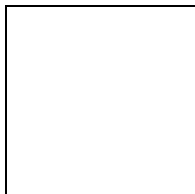


- кут між провідником і силовими лініями.

Якщо провідник нерухомий чи переміщується паралельно силовим лініям



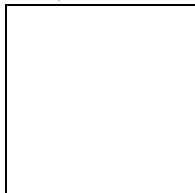
магнітного поля, то ЕРС індукції не виникне, тобто $\alpha = 0^\circ$, то



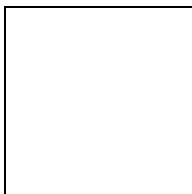
Якщо переміщувати провідник перпендикулярно силовим лініям магнітного



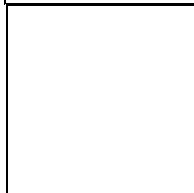
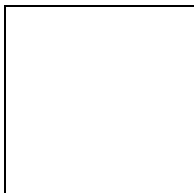
поля, то ЕРС індукції буде найбільша, тобто $\theta = 90^\circ$, то:



Коли провідник замкнений, то в електричному полі під дією ЕРС індукції виникає безперервний рух електронів, тобто електричний струм, величина якого визначається за законом Ома:



де R - сумарний опір провідника (чи електричного кола), Ω



E - ЕРС електромагнітної індукції, V

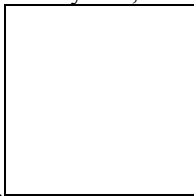
16.3 Правило правої руки

Напрямок ЕРС індукції збігається з напрямком МРС, яка діє на позитивний заряд, й протилежна напрямку МРС, яка діє на електрон. Для визначення напрямку ЕРС індукції (чи МРС) використовують правило правої руки: якщо долоню правої руки розмістити так, щоб магнітні лінії входили в неї, а відігнутий великий палець направити уздовж вектора швидкості, то чотири пальця, які залишилися вкажуть напрямок ЕРС індукції.

Для визначення напрямку ЕРС індукції (чи МРС) котушки чи витка зі струмом можна використовувати видозмінене правило правої руки: якщо обхватити котушку (виток) правою рукою так, щоб чотири її пальця

розмістилися за напрямком струму у витках котушки, то відігнутий великий

палець руки вкаже напрямок ЕРС індукції,



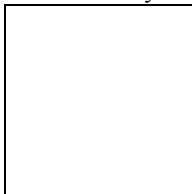
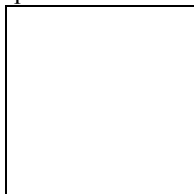
17 Закон електромагнітної індукції

17.1 Закон електромагнітної індукції

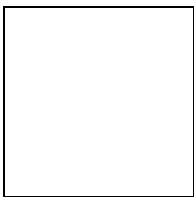
Якщо переміщувати провідник перпендикулярно силовим лініям магнітного

поля, то виникає ЕРС індукції:

При заміні у формулі швидкості на зміну шляху та зміну часу отримаємо:

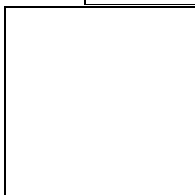


Позначив

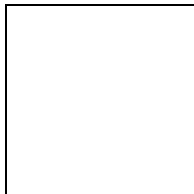


- площа поверхні, яку описує провідник при русі за

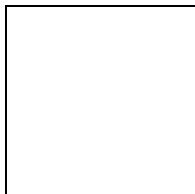
час



, m^2 :



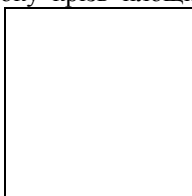
де



- магнітний потік крізь поверхню, яку описує провідник при русі, $B\delta$

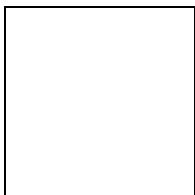
Закон електромагнітної індукції чи Фарадея Максвелла:

ЕРС електромагнітної індукції в замкнутому контурі дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку крізь площину, обмежену цим потоком:

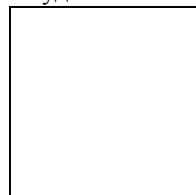


Якщо магнітний потік зменшується й швидкість його зміни буде

негативною:



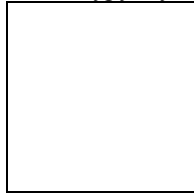
, то ЕРС буде позитивною:



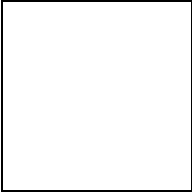
Тобто ЕРС індукції протидіє зміні магнітного потоку і направлена однаково з зовнішнім магнітним полем.

Якщо магнітний потік контуру буде збільшуватися, швидкість його зміни

буде позитивною:



то ЕРС - негативна:



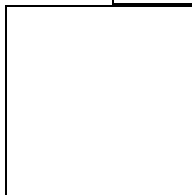
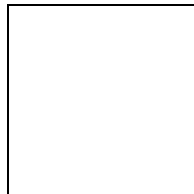
Тобто ЕРС індукції протидіє зміні магнітного потоку і направлена назустріч зовнішньому магнітному полю.

Коли котушка має ω послідовно з'єднаних витків, то ЕРС виникає у кожному витку котушки й сумарна ЕРС буде:

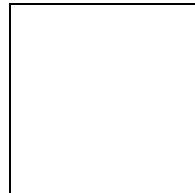


Потокозчеплення - це алгебраїчна сума магнітних потоків, зчеплених з

окремими витками кола. Позначається -



Таким чином, ЕРС котушки буде:



17.2 Правило Ленца

Якщо приблизити чи віддалити магніт до замкненої котушки, то в котушці індуються струми. За допомогою гальванометра можна визначити напрямок струму, а потім за правилом годинникової стрілки визначити полюса котушки. Виявляється, що при приближенні полюса магніту до котушки на ближчій її кінці виникає одноіменний полюс, при віддаленні полюса магніту на ближчій кінці котушки виникає різноіменний магнітний полюс. Це показує, що магнітне поле наведеного струму протидіє руху магніту. За законом збереження енергії за рахунок роботи по переборюванню протидії руху магніту, створюється енергія індукovanого струму. Ці дослідів проводив у 1833 – 1834 роках руський вчений Ленц.

Він встановив правило (закон) напрямку індукovanого струму, яке названо в його ім'я: напрямок індукovanого струму завжди такий, що його магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, який визвав цей струм.

Таким чином, ЕРС індукції має завжди такий напрям, що наведений струм, який вона створила, перешкоджає причині, яка її викликала. Чи індукований струм створює свій магнітний потік, так щоб компенсувати зміну (збільшення чи зменшення) магнітного потоку, який викликав цей струм.

Напрямок індукovanого струму збігається з напрямком ЕРС, тобто визначається за правилом правої руки.

17.3 Види магнітних полів

Якщо провідник нерухомий й по ньому протікає струм незмінного напрямку й сили, то у будь-якій точці його магнітного поля індукція буде зберігати незмінну величину та напрямок. Тобто вектор індукції в усякій точці магнітного поля буде постійним з часом. Теж саме можна сказати о полі постійного магніту.

Магнітне поле, вектор індукції в усіх точках якого залишається незмінним з часом, називається постійним.

Якщо переміщати провідник зі струмом, змінювати в ньому силу струму (частково збільшувати чи зменшувати її за допомогою реостату або повністю вимикати струм за допомогою вимикача), змінювати напрямок струму у провіднику, то магнітне поле буде змінюватися й вектор індукції у кожній точці поля теж змінюється. Тобто змінюється величина чи напрямок, або то й інше, з часом. Переміщаючи постійний магніт, ми також отримуємо магнітне поле, яке змінюється у кожній точці.

Магнітне поле, вектор індукції в усіх точках якого змінюється за величиною чи напрямком з часом, називається змінним. Велике практичне значення має змінне магнітне поле для вивчення властивостей феромагнетиків.

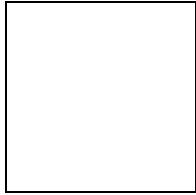
18 Феромагнетики

18.1 Намагнічування феромагнетиків

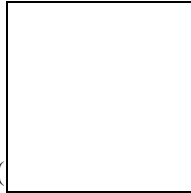
В залежності від величини магнітної проникності розрізняють парамагнітні, діамагнітні та феромагнітні речовини.

Парамагнітними називають речовини, у яких магнітна проникність

ненабагато більша ніж у вакууму ($\mu \approx 1$:



вольфрам $=1,000175$,

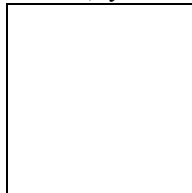


повітря $=1,0000031$). До них

відносяться: алюміній, платина, натрій, хром, марганець, кисень... Якщо помістити алюмінієвий стрижень на нитці у магнітне поле, то він розміститься уздовж силових ліній поля. Так ведуть себе усі парамагнетики у магнітному полі. Тобто вони ненабагато збільшують його у кінця стрижня за рахунок свого магнетизму. Це можна пояснити тим, що в атомах парамагнітної речовини електрони, які рухаються по орбітам навколо ядер атомів, володіють власним магнітним полем. Магнітне поле таких електронів дуже слабе, але завдяки своєрідному розміщенню їх орбіт у просторі, при якому магнітні поля частково підсилюють один одного, магнітне поле атома стає з явно вираженими, хоча й слабкими, магнітними полюсами. Під дією зовнішнього поля утворюються ланцюжки з таких атомів, які уявляють собою дуже слабкі магнітики. В результаті чого загальне магнітне поле атомів стає направленим уздовж зовнішнього поля, яке намагнічує парамагнетик, що веде к підсиленню зовнішнього поля у кінців стрижня й його ослабленню поряд зі стрижнем.

Діамагнітними називають такі речовини, у яких магнітна проникність менша

ніж у вакууму ($\mu < 1$:



мідь $=0,999912$). До них

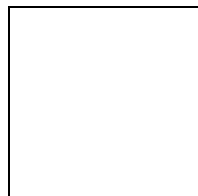
відносяться: свинець, срібло, гелій, аргон, мідь, золото, усі органічні речовини

- вода, цукор, крохмаль... Якщо помістити мідний стрижень на нитці у магнітне поле, то він розміститься перпендикулярно до силових ліній поля. Діамагнетики ослаблюють магнітне поле у своїх кінців. Магнітне поле усередині діамагнетика ще більш слабше ніж зовні. Це можна пояснити тим, що в атомах діамагнітної речовини рух електронів навколо ядер відбувається в різних напрямках й в більшості прямо протилежних. В результаті чого магнітні полюса полів електронів нейтралізуються й атоми є нейтральними в магнітному відношенні. Зовнішнє магнітне поле, діючи на електрони атомів діамагнетиків, змінює напрямок руху деяких з них, але й саме відчуває їх протидію. В результаті діамагнетик небагато намагнічується, але його поле направлено назустріч зовнішньому магнітному полю, що ослаблює зовнішнє поле.

Для технічних розрахунків магнітні проникності діамагнетиків та парамагнетиків приймають рівним 1.

Феромагнітними називають такі речовини, у яких магнітна проникність

набагато більша ніж у вакууму ($\mu > 1$: залізо $\mu = 5000$,



нікель $\mu = 300$).

До них відносяться: залізо, чавун, нікель, сталь, кобальт ряд магнітних сплавів - магніко... Якщо помістити залізний стрижень на нитці у магнітне поле, то він розміститься уздовж силових ліній поля. Так ведуть себе усі феромагнетики у магнітному полі. Тобто вони намагнічуються й значно посилюють його за рахунок свого магнетизму у полюсів. Магнітна індукція феромагнетиків набагато більша ніж парамагнетиків. Там де потрібно отримати сильне магнітне поле використовують феромагнітні матеріали. Їх сильне намагнічування пояснюється тим, що усередині їх є області спонтанного (самостійного) намагнічування, які називають доменами. Напрямки магнітних полів в окремих доменах неоднакові, тому при відсутності зовнішнього магнітного поля феромагнетики у цілому залишаються не намагніченими. Під дією зовнішнього магнітного поля домени перемагнічуються так, що їх магнітні поля підсилюють один одного. Максимальне підсилення відбувається, коли магнітні поля у всіх доменах направлені уздовж зовнішнього магнітного поля. Намагнічування феромагнітного матеріалу не може зростати безмежно. Якщо напрямок полів самодовільного намагнічування у всіх областях виявиться таким, що збігається з напрямком зовнішнього магнітного поля, намагнічування досягне своєї межі.

Стан найбільшого намагнічування феромагнетиків називається магнітним насиченням. Утворення доменів пояснюється наявністю у електронів власного (чи так називаємого спинового) магнітного моменту. Спин електрона - це його рух навколо власної вісі. В результаті цього обертового руху електрон теж утворює магнітне поле. При певній температурі, яку назвали точкою Кюрі, магнітні властивості феромагнетиків зникають. Феромагнетик, нагрітий вище точки Кюрі, стає парамагнетиком. Точка Кюрі для заліза дорівнює 770°C .

Результуюча магнітна індукція у феромагнітному матеріалі:

$$B = B_0 + \mu_0 M$$









де

σ - напруженість матеріалу, A/m

B_0

μ_0

M

B - намагніченість матеріалу, A/m

B_0

μ_0

M

B - магнітна стала, Гн/м

B_0

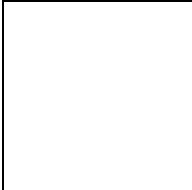
μ_0

M

З іншого боку, магнітна індукція пов'язана з напруженістю магнітного поля

$$B = \mu H$$

відношенням:

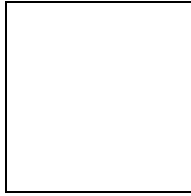


B

μ

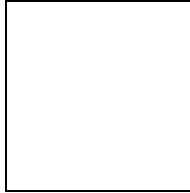
H

Таким чином, абсолютна магнітна проникність феромагнітного матеріалу буде:



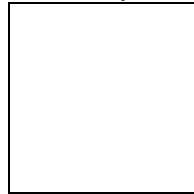
Непрямолінійний характер зміни намагнічування в залежності від

напруженості доведе, що відношення



не є постійною

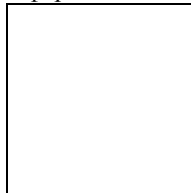
величиною. При збільшенні напруженості це відношення спочатку швидко росте, а потім його ріст зменшується, в невеликому інтервалі напруженості воно залишається практично постійним й починає зменшуватися, асимптотичне



наближатися до нуля. Той самий характер має . Як видно з графіка, магнітна проникність змінюється при зміні напруженості поля (наприклад, в результаті зміни струму у котушки) у цілком великих межах, тому цю величину не використовують для розрахунків магнітного поля у феромагнетиків.

18.2 Циклічне перемагнічування

Для характеристики властивостей феромагнетиків використовують криву

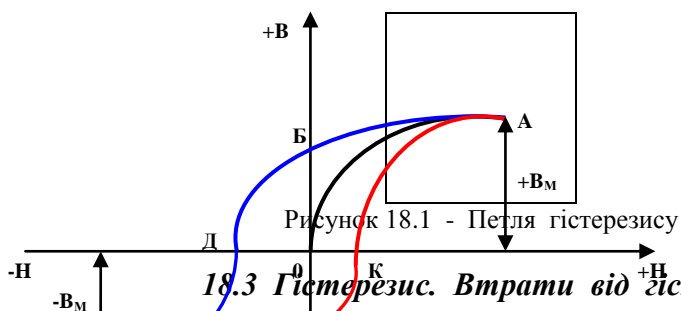


намагнічування:

Якщо у котушці зі стальним осердям збільшувати струм, напруженість магнітного поля у котушці буде збільшуватись, що приведе до збільшення магнітної індукції у стальному осерді, майже лінійно. Залежність між напруженістю й індукцією зображується кривою ОА, яку називають кривою намагнічування (чи кривою початку намагнічування).

Кожний феромагнітний матеріал має характерну криву намагнічування, яку використовують для розрахунку магнітних кіл електричних апаратів і машин.

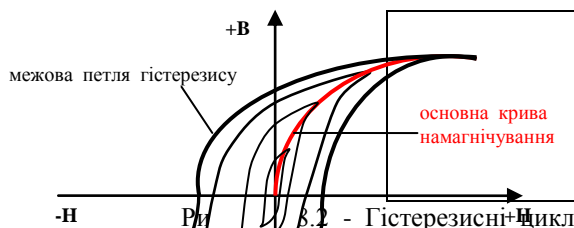
Якщо далі збільшувати напруженість, то індукція вже не збільшується, а залишається постійною. Ця ділянка відповідає магнітній насиченості сердечника. Тепер зменшуємо напруженість до нуля. При цьому магнітна індукція зменшується, але не до нуля (крива АБ), а до певної величини індукції, яку називають залишковою. Тобто процес розмагнічування сталі відстає від процесу її намагнічування. Це явище запізнення зміни магнітної індукції від зміни напруженості зовнішнього поля називається гістерезисом. Щоби звести магнітне поле до нуля, тобто індукцію, потрібно змінити напрям струму і створити негативну напруженість поля, яку називають коерцитивною силою - напруженість, при якій індукція буде дорівнювати нулю (відрізок ОД). При подальшому збільшенні негативної напруженості ми знову отримаємо магнітну насиченість сердечника, але негативну. Змінюючи напруженість поля до нуля ми знову отримаємо залишкову індукцію (ОЕ). Змінив напруженість на позитивну й збільшив її до значення ОК, ми отримаємо індукцію рівну нулю. Збільшуючи напруженість поля далі, ми доведемо індукцію до магнітної насиченості (КА). Таким чином, однією зміною циклу струму отримуємо замкнену криву перемагнічування сталі, яку називають петлею гістерезису (рис.18.1).



18.3 Гістерезис. Втрати від гістерезису

Магнітний стан феромагнетика, який піддається змінному намагнічуванню, характеризується гістерезисним циклом. Крива, яка зображує зміну магнітної індукції в залежності від напруженості при намагнічуванні, називається кривою початку намагнічування. Крива при розмагнічуванні феромагнетиків піде вище за криву початку намагнічування й для одного і того ж значення напруженості індукція при намагнічуванні та розмагнічуванні буде різною. Коли струм та напруженість поля буде дорівнювати нулю, магнітна індукція збереже деяке значення, яке назвали залишковою індукцією. Таким чином, величина магнітної індукції залежить не лише від напруженості поля, а й від попереднього стану намагнічування, в якому знаходився матеріал. Це явище називають гістерезисом. Щоб довести магнітну індукцію до нуля, потрібно змінити напрямок струму в обмотці й створити поле з певним значенням напруженості, яка називається коерцитивною силою. В результаті повторного циклічного перемагнічування магнітна індукція змінюється в залежності від напруженості поля по замкненій кривій, яка називається гістерезисним циклом

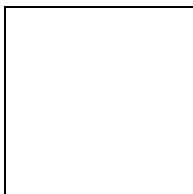
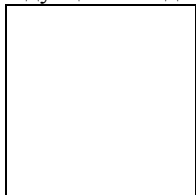
чи петлею гістерезису. Свою кінцеву форму крива отримає після кількох циклів перемагнічування при одному й тому ж значенні максимальної напруженості (при магнітному насиченні). Так як при намагнічуванні напруженість була максимальна, то отримана петля називається межевою петлею гістерезису. При різних значеннях напруженості гістерезисні цикли виявляються якби вкладеними один в одного. Геометричне місце їх вершин дає криву, яка називається основною кривою намагнічування й приблизно збігається з кривою початку намагнічування (рис.18.2).

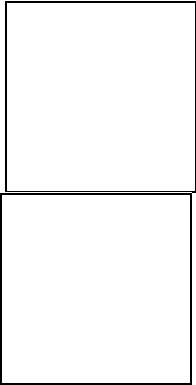
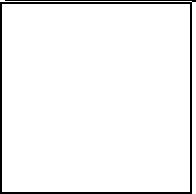


Циклічним перемагнічуванням можна скористатися для розмагнічування осердя (у розмагніченого осердя магнітна індукція дорівнює нулю). Для цього на зразок діють змінним по напрямку й поступово зменшуючи за величиною магнітним полем.

Перемагнічування сталі пов'язано з витратами енергії, яка перетворюється у тепло й нагріває осердя. Площа петлі гістерезису пропорційна втратам енергії при певному масштабі, яка витратилася на перемагнічування при одному циклі. Цю витрачену енергії не як не використовують, тому її називають втратами енергії на перемагнічування матеріалу осердя (чи втратами енергії від гістерезису). Досліди перемагнічування сталі були проведенні уперше руським вченим А.Г.Столетовим у 1872 році й положенні в основу розрахунку електричних машин та апаратів.

Питома потужність втрат від гістерезису визначається за емпіричною формулою Штейнметца й залежить від матеріалу, максимальної магнітної індукції та від кількості циклів перемагнічування у секунду. Позначається -



де  - сталий коефіцієнт, що залежить від марки сталі,
 - частота перемагнічування,
 α - показник ступені амплітуди магнітної індукції: $\alpha = 2$ при $B \geq 0,8 \text{ Тл}$,
 $\alpha = 1,6$ при $B < 0,8 \text{ Тл}$

19 Феромагнітні матеріали

19.1 Класифікація феромагнітних матеріалів

Феромагнітні матеріали розділяють на групи:

1 Магніто-м'які. Мають високу магнітну проникність (тобто при відносно малих значеннях напруженості магнітного поля повинні бути великі величини магнітних індукцій) й малу коерцитивну силу (нижче 400 А/м). В результаті чого з таких матеріалів виготовляють осердя електромагнітів, полюсні наконечники, використовуються в електромагнітних пристроях із змінними полями. Ці матеріали мають найвужчу петлю гістерезису - дуже малі площа та втрати на перемагнічування. До цієї групи відносяться технічне залізо й низьковуглецеві сталі, листові електротехнічні сталі, пермалої, оксидні феромагнетики (ферити й оксифери), альсифери, магнетити.

Технічне залізо з домішкою вуглецю до 0,04%, вуглецеві сталі й чавун використовують для магнітопроводів, які працюють в умовах постійних магнітних полів.

Електротехнічні сталі - це сплави заліза з кремнієм (1÷4%). Кремній покращує властивості технічного заліза: збільшується магнітна проникність, зменшується коерцитивна сила та втрати енергії від гістерезису та вихрових струмів.

Серед магніто-м'яких матеріалів особливе значення придбали магнітодіелектрики. Вони дуже добре проводять магнітні потоки, але володіють малою електропровідністю, що значно знижує в них втрати енергії при змінних струмах високої частоти. Магнітодіелектрики виготовляються з мілкого залізного порошку, частки якого зв'язані електроізолюючим лаком.

Альсифер володіє початковою відносною магнітною проникністю 35000, максимальною відносною магнітною проникністю 110000, магнітною індукцією насиченості 1,5 Тл. Пермалої - це сплави різного відсоткового складу заліза та нікелю. Також можуть бути невеликі домішки хрому, кремнію, алюмінію, молібдену. Мають високу магнітну проникність (більше ніж у електротехнічної сталі в $10 \div 15$ раз).

Ферити - це окис заліза з металами - нікелем, цинком... Ферити завдяки великому питомому опору є напівпровідниками. Втрати в них на вихрові струми при високих частотах відносно малі. Ферити були розроблені руським професором Г.А.Займовським. Магнетит - це ферит, який не містить ніяких інших металів, окрім заліза - це окис заліза Fe_3O_4 .

2 Магніто-тверді. Мають невелику магнітну проникність, високу залишкову магнітну індукцію й велику коерцитивну силу. Тобто, мають широку петлю гістерезису. Використовують для виготовлення постійних магнітів.

До магніто-твердих матеріалів відносяться вуглецеві, вольфрамові, хромисті та кобальтові сталі з коерцитивною силою $5000 \div 8000$ А/м і залишковою індукцією $0,8 \div 1$ Тл. Вони володіють ковкістю, піддаються прокатці, механічній обробці й випускаються у вигляді смуг чи листів.

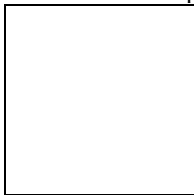
Займовський розробив ряд залізо-нікелево-алюмінієвих сплавів з високими магнітними властивостями. До них відносяться альні, альнісі й альніко з коерцитивною силою $20000 \div 60000$ А/м і залишковою індукцією $0,4 \div 0,7$ Тл. Ці сплави нековкі матеріали, тому магніти з них отримують шляхом їх відливки чи спікання.

До нових магніто-твердих матеріалів з покращеними магнітними властивостями відносяться сплави платини з залізом чи кобальтом. Постійні магніти, виготовлені з залізо-нікелево-алюмінієвих, платиново-кобальтових чи платиново-залізних сплавів, володіють відносно великою енергією. Наприклад, в 1 см^3 постійного магніту, виготовленого з магніко, утримується магнітної енергії у 15 разів більше ніж у постійному магніту з вольфрамової сталі. Тому постійні магніти з цих сплавів менше за розмірами, що дуже важливо при конструюванні електромагнітних механізмів.

19.2 Вихрові струми. Втрати в сталі

Згідно правилу Ленца у провіднику виникають індуковані струми. Якщо провідник рухається у магнітному полі, то ці індуковані струми виявляються короткозамкненими у речовині провідника. Ці струми називають вихрові (кільцеві) чи струмами Фуко - в ім'я французького вченого, який їх відкрив та вивчив. Вони у свою чергу створюють магнітне поле, яке протидіє руху провідника. Наприклад, якщо в обмотці котушки з масивним стальним осердям проходить змінний струм, то в осерді наводяться вихрові струми, які замикаються у площині, яка перпендикулярна вектору магнітної індукції.

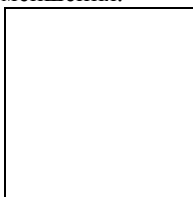
Також, вихрові струми виникають при обертанні в магнітному полі якоря



електричної машини.

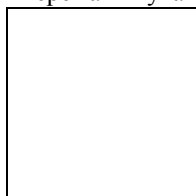
Внаслідок вихрових струмів виділяється велика кількість тепла, що приводе до нагріву сталі й втрат електроенергії. Також вони чинять розмагнічення, створюючи МРС, яка направлена назустріч основної МРС (правило Ленца). Тобто в електричних машинах та апаратах ці струми небажані - вони викликають додаткові втрати й приводять до зниження ККД.

При суцільному осерді площа перетину шляхів замикання струмів велика, отже їх опір малий і струми можуть досягти великих значень. Для їх зменшення осердя електричних машин та апаратів виготовляють не суцільним, а збирають з тонких пластин (товщиною $0,2 \div 0,5 \text{ мм}$), ізольованих один від одного лаком. Щоб вихрові струми були мінімальні, поверхні листів осердя розміщують паралельно магнітним лініям. Таке виконання магнітопровода дає значне збільшення опору шляхів замикання струмів й приводить до їх зменшення.

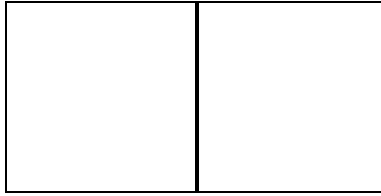


Також, для виготовлення осердя використовують спеціальний сорт сталі з великим питомим опором - леговане залізо, яке містить до 4,8% кремнію. Додаток кремнію не змінює магнітних властивостей заліза, але збільшує його питомий опір, внаслідок чого зменшуються вихрові струми й втрати електроенергії.

Питома потужність втрат у сталі від вихрових струмів, як й втрати від гістерезису, залежить від матеріалу, максимальної магнітної індукції та від кількості циклів перемагнічування у секунду (частоти перемагнічування).



Позначається -

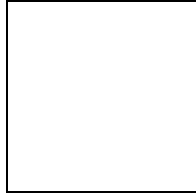


Теплова дія вихрових струмів знайшла й корисне використання: в електрометалургії - індукційні печі для отримання високоякісних сплавів; також для закалювання деталей, інструментів й для сушки матеріалів, нагріву рідин та газів у металевих сосудах. В цих приладах деталь яку нагрівають поміщують у змінне магнітне поле, яке породжується струмом у котушці-індукторі.

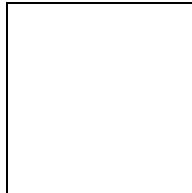
Якщо маятник з суцільного куска алюмінію чи міді привести до руху між полюсами електромагніта, то при відключеному струмі в котушці магніту, маятник качається. При ввімкненні струму виникають вихрові струми й маятник зупиняється. Тобто, вихрові струми викликають гальмування. Якщо в маятнику зробити смуги, то струми Фуко зменшуються й маятник зупиняється за більший час. Чим більше смуг, тим менше вихрові струми й гальмування маятника. Цю властивість вихрових струмів використовують для приладів заспокоювачів стрілок гальванометрів й в індукційних лічильниках електроенергії для гальмування обертів алюмінієвого диску лічильника.

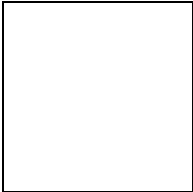
Втрати в магнітопроводі від гістерезису та вихрових струмів називають

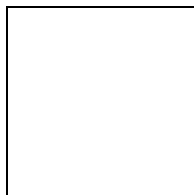
втратами в сталі -



Для визначення втрат у сталі на практиці використовують довідники, в яких вже вказана питома потужність загальних втрат у сталі (від гістерезису та вихрових струмів) в залежності від значення амплітуди магнітної індукції та марки сталі:



де  - маса сталі магнітопроводу, кг



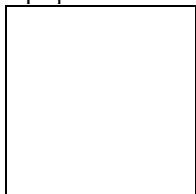
20 Магніти

20.1 Постійні магніти

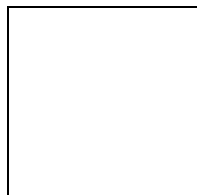
Тіла, які постійно притягують до себе залізо, нікель, кобальт тощо, називаються постійними магнітами. Залізна руда, яка називається магнітним залізняком, володіє властивостями притягувати до себе залізні предмети. Кусок такої руди є природним постійним магнітом. Залізо, нікель, кобальт, сталь, хром та деякі сплави у присутності цієї руди придбають магнітні властивості. Постійний магніт можна отримати шляхом введення сталюого стрижня усередину котушки, по якій протікає струм. Але усі перелічені тіла, за виключенням сталі та спеціальних сплавів, втрачають магнітні властивості при віддаленні тіла, яке їх намагнітило. А в сталі за рахунок перемагнічування доменів у напрямку зовнішнього магнітного поля вісі обертання електронів стають паралельні один одному. Взаємодія між доменами може зберігатися довго і після вилучення сталюого осердя з котушки. Таке осердя буде постійним магнітом й утворить навколо себе сильне магнітне поле. Тому сталь, особлива вольфрамова, хромово та кобальтова, є матеріалом для виготовлення штучних магнітів. Магнітні властивості магніту можуть бути визначені по вазі усіх залізних предметів, які він утримує після притягіння. Магніт володіє найбільшою силою притягіння на кінцях, які називаються полюсами магніту. По мірі приближення до середини середньої частини магніту ця сила зменшується й посередині дорівнює нулю, так звана нейтральна лінія.

Якщо підвісити магніт на нитці, то він встановлюється так, що один кінець його буде звернений на північ (цей кінець називають північним магнітним полюсом), а інший - на південь (цей кінець називають південним магнітним полюсом). Для зручності використовують стрілку, яка вільно обертається навколо вертикальної вісі (наприклад, у компасі). Дослідно встановлено, що

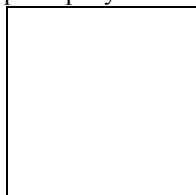
однойменні полюса магнітів взаємно відштовхуються, а різнойменні - взаємно притягуються. Стрілка компаса повсюдно приймає певний напрямок (приблизно уздовж географічного меридіана), отож, Земля є надвеликим магнітом. Її південний магнітний полюс знаходиться поблизу північного географічного полюсу, а північний магнітний полюс - біля південного географічного полюсу. Тому, стрілка компасу увесь час встановлюється своїм північним полюсом на географічний північ й навпаки.



Постійні магніти використовуються для створення магнітного поля у пристроях автоматики, телемеханіки, зв'язку, виміральної техніки тощо. Виготовляють їх з магніто – твердих феромагнітних матеріалів, які володіють високою залишковою індукцією й великою коерцитивною силою. Його властивості характеризуються ділянкою петлі гістерезису при

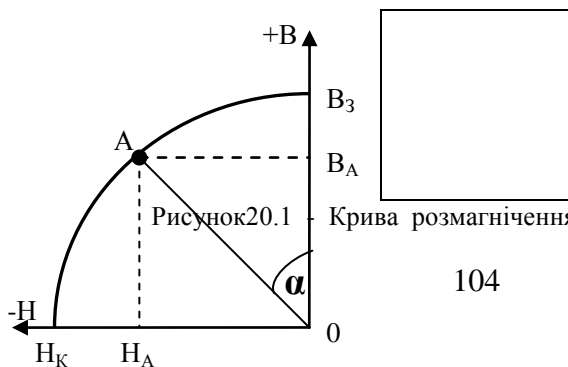


та



, яку називають кривою розмагнічування

гістерезисного циклу. Якість матеріалу для виготовлення магнітів визначається добутком залишкової індукції (B_z) й коерцитивної сили (H_K). Чим більше цей добуток, тим краще матеріал для виготовлення магнітів. Отримують криву розмагнічування при розмагнічуванні попередньо намагніченого до стану насичення замкнутого магнітопроводу з феромагнітного матеріалу, але звичайно коло постійного магніту не замкнено. Воно складається з магніту, приєднаної до його кінців арматури з магніто – м'якої сталі, й повітряних зазорів, які викликають зменшення залишкової індукції при зрівнянні з тою, яку отримали би при замкнутому магнітному колі. Введення повітряного зазору у магнітне коло еквівалентно розмагніченій дії деякого уявного струму, направленного зворотню струму в обмотці при намагнічуванні без зазору. Тобто, повітряний зазор викликає розмагнічену дію.



Крива розмагнічення матеріалу магніту

Знаючи коефіцієнт розмагнічення, за кривою розмагнічення матеріалу магніту (рис.20.1) можна визначити магнітну індукцію у магніті, тобто у точці А. Тангенс кута α визначає коефіцієнт розмагнічення:



Таким чином, коефіцієнт розмагнічення прямо пропорційний довжині повітряного зазору й зворотно пропорційний довжині магніту.

20.2 Електромагніти

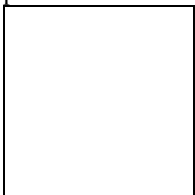
Соленоїд (котушка з залізним чи стальним осердям) називається електромагнітом. Вони володіють більшими магнітними полями ніж котушки без сталі.

Під дією магнітного поля струму, який протікає по соленоїду, намагнічується осердя й утворюється сильний електромагніт, який відрізняється від постійного магніту тим, що:

- 1 притягіння завжди можна припинити,

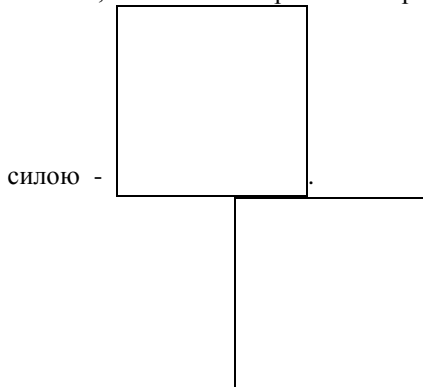
- 2 силу притягання електромагніта можна змінювати,
- 3 він може мати набагато сильніше магнітне поле.

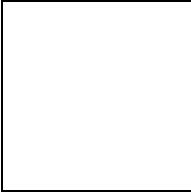
Полюса електромагнітів визначаються за правилом свердлика чи правилом правої руки для котушки. Електромагніти мають різну форму й величину. Руські вчені Б.С.Якобі й Е.Х.Ленц уперше дослідили й визначили силу притягання електромагнітів.

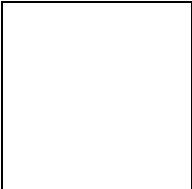


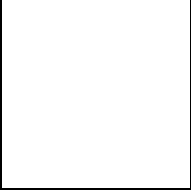
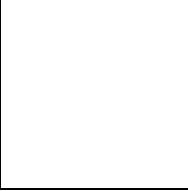
Розглянемо електромагніт стрижньової форми з циліндричним стальним осердям, на який нанесена обмотка. Коли скрізь обмотку пропустити струм, то в котушці виникне магнітне поле, яке намагнічує стальне осердя, створюючи в ньому деяку магнітну індукцію. Визначаємо полярність електромагніта за правилом свердлика чи правилом правої руки для котушки. Приблизимо до торця поверхні осердя плоский кусок сталі (якір) так, щоб плоский торець осердя й площина якоря розмістилися паралельно один одного. Лінії магнітної індукції з північного полюсу торця осердя будуть проникати у тіло якоря, коли вони його пройдуть, вони повернуться до південного полюсу та через нього замкнуться на себе. Під впливом магнітного поля електромагніту якір намагнітиться так, що на його площині, яка звернена до північного полюсу електромагніту, виникає південний магнітний полюс. Різнойменні магнітні полюси осердя й якорю притягуються один до одного:

Сила, з якою електромагніт притягує якір, називається його підйомною



де  - магнітна індукція між площинами осердя електромагніта й якоря, T_l

 - площа перерізу магнітопроводу, m^2

 - магнітна стала, 

Для підковоподібного електромагніту ця сила більше у два рази ніж у стержньового.

З цієї формули видно, що тягове зусилля електромагніту зростає пропорційно квадрату магнітної індукції. Але збільшення індукції веде до переходу на насичену ділянку кривої намагнічування, тобто до значного збільшення необхідної магніторушійної сили i , внаслідок цього - до суттєвого збільшення габаритів котушки.

Осердя й якір електромагніту виготовляють з магніто - м'якої сталі, тому при розмиканні кола вони розмагнічуються й сила стає рівною нулю.

Використовуються електромагніти в електричних дзвінках, реле, електромагнітних кранах, електровимірювальних приладах, електромашинах та апаратах, медицині, автоматичних пристроях,...

В електромагнітних пристроях з рухомими частинами магнітне поле завжди намагається викликати таке переміщення, в результаті якого магнітний опір стає мінімальним. Розглянемо котушку, яка втягує осердя з магніто – м'якої сталі всередину. Осердя втягується до середини котушки, тобто до області поля, де магнітна індукція максимальна, незалежно від напрямку магнітних ліній поля. Коли осердя розташоване всередині котушки, магнітний опір шляхів замикання магнітних ліній стає мінімальним.

Ефект втягування металевих осердь до котушки або притягування рухомої частини магнітопроводу до нерухомої широко використовується у вимірювальних приладах електромагнітної системи, комутуючих апаратах (таких як контактори, реле, магнітні пускачи).

21 Магнітні кола

21.1 Класифікація магнітних кіл

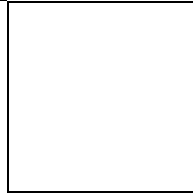
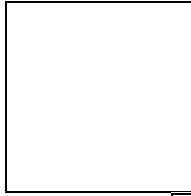
Магнітне коло - це шляхи по яких замикаються магнітні лінії. В електромагнітних пристроях магнітне коло створюється феромагнітними та не феромагнітними ділянками, призначеними для створення магнітного поля потрібної конфігурації та інтенсивності. Магнітне поле в електромагнітних пристроях з постійною МРС створюється або постійним магнітом або котушкою з постійним струмом, розташованій на якійсь з ділянок магнітопроводу. В електромагнітних перетворювачах (трансформаторах, магнітних підсилювачах тощо) магнітопровід може не мати повітряних проміжків, але в електромеханічних перетворювачах, призначених для отримання певної силової дії (реле, контактори, електричні машини тощо) повітряний проміжок є обов'язковим. Просте магнітне коло - це коло, в якому магнітний потік ніде не розгалужується, тобто однаковий. Прикладом найпростішого магнітного кола є магнітопроводи кільцевої котушки. Однорідне магнітне коло - це коло, яке виконано з одного матеріалу й має по всій довжині однаковий переріз. Якщо окремі ділянки кола виготовлені з різних феромагнітних матеріалів й мають різні довжини чи перерізи, то коло - неоднорідне.

Магнітні кола, як і електричні, бувають нерозгалужені (коли магнітний потік в усіх перерізах однаковий) й розгалужені (коли магнітний потік в перерізах різний та йде по різним напрямках, тобто має розгалуження). Розгалужені кола діляться на симетричні (магнітні опори усіх контурів однакові) та несиметричні (магнітні опори усіх контурів різні). Коло, ділянки якого мають однакові розміри, однакову МРС і виконані з одного матеріалу, вважаються симетричними. При невиконанні хоч однієї умови коло буде несиметричне.

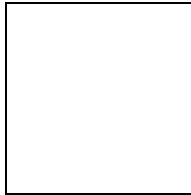
Багато електричних машин мають магнітне коло у вигляді двох сталених циліндрів з однією віссю й відокремлених один від одного невеликим повітряним зазором. Внутрішній обертовий циліндр називають ротором. Зовнішній нерухомий циліндр називають статором, на ньому розміщується обмотка збудження. При наявності струму в обмотці збудження у магнітному колі виникає магнітний потік, який замикається по ротору, повітряному зазорі й статору. Місце виходу ліній магнітної індукції з ротору є північним полюсом, а місце входу - південним.

21.2 Закон Ома для ділянки магнітного кола. Магнітний опір

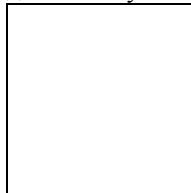
Магнітна напруга на однорідній ділянці магнітного кола:



За аналогією з електричним колом величину називають
магнітним опором ділянки магнітного кола.

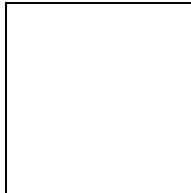


З формули видно, що магнітний опір прямо пропорційний довжині магнітопроводу, обернено пропорційний його площі поперечного перерізу та залежить від магнітної проникності матеріалу осердя. Чим більше магнітна проникність, тим менше при інших однакових умовах магнітний опір. Таким

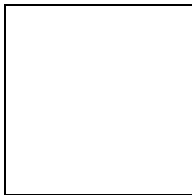


чином, магнітна напруга буде:

Цей вираз за аналогією з електричним колом називають законом Ома для ділянки магнітного кола: магнітний потік прямо пропорційний МРС й обернено пропорційний опору ділянки цього магнітного кола:

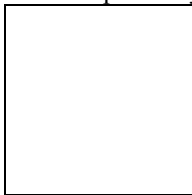


Закон Ома для послідовного магнітного кола (з кількома МРС й ділянками кола) буде: магнітний потік в послідовному магнітному колі прямо пропорційний алгебраїчній сумі МРС, які діють у колі, й обернено пропорційний повному опору магнітного кола:



Але внаслідок не лінійності кола, викликаной непостійністю магнітної проникності феромагнетиків, цей закон практично не використовується для розрахунків магнітних кіл. З закону Ома видно, що для отримання найбільшого магнітного потоку при найменшій МРС у магнітного кола повинний бути як можливо меншим магнітний опір, тобто магнітопровід повинен бути виготовлений з магніто – м'якого матеріалу з високою магнітною проникністю. Велика магнітна проникність магніто – м'яких феромагнітних матеріалів забезпечує отримання малих магнітних опорів магнітопроводів. Тому магнітні кола електричних машин виготовляють з феромагнетиків, а ділянки кола з не феромагнітних матеріалів (тобто повітряні зазори) роблять як можна меншими.

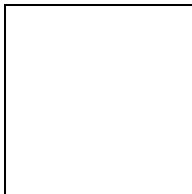
З закону Ома видно, що магнітний потік розподіляється в паралельних вітках зворотно пропорційно магнітним опорам цих віток (як струми у паралельному сполученні опорів в електричному колі):

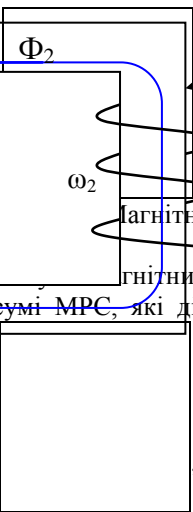



21.3 Закони Кірхгофа для магнітного кола

При розрахунках розгалужених магнітних кіл користуються двома законами Кірхгофа, які аналогічні законам Кірхгофа для електричних кіл. *I* закон Кірхгофа витікає з безперервності магнітних ліній, тобто й магнітного потоку. *II* закон Кірхгофа базується на законі повного струму.

I закон Кірхгофа: алгебраїчна сума магнітних потоків у точці розгалуження дорівнює нулю:

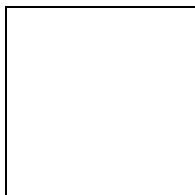




| |
|--|
| |
|--|

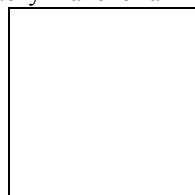
галужених

111



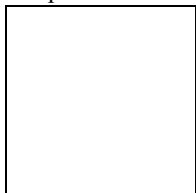
При розрахунках магнітне коло ділиться по можливості на невелику кількість ділянок, на яких напруженість й індукцію можна вважати постійними. Довжиною кожної ділянки можна вважати довжину середньої магнітної лінії потоку. Також потрібно знати, що на маленький повітряний проміжок витрачається більша частка МРС. Для зручності магнітне коло зіставляють з електричним.

На рисунку 21.2 показано сталевий магнітопровід, який складається з нерухомого ярма, полюсів електромагніта та рухомого якоря. При протіканні струму по котушці, розташованій на ярмі, створюється магнітний потік, незначна частина якого замикається по повітрю навколо котушки і називається потоком розсіювання (Φ_0), а більша частина потоку замикається по феромагнітному ярму з полюсами, двом повітряним проміжкам та феромагнітному якорю. Оскільки довжина повітряних проміжків значно менша за довжину замикання по повітрю магнітних ліній потоку розсіювання, а відносна магнітна проникність сталі $\gg 1$, то можна знехтувати потоком розсіювання і вважати, що МРС котушки створює лише робочий потік у магнітопроводі (Φ), який замикається по феромагнітних ділянках магнітопроводу через два повітряні проміжки довжиною δ . Заступна схема

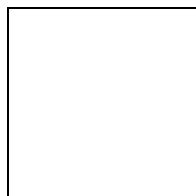


цього кола показана на рис.10.1 і має у своєму складі МРС

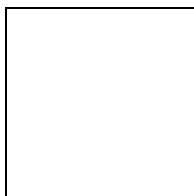
магнітний опір ярма



, два магнітних опори полюсів

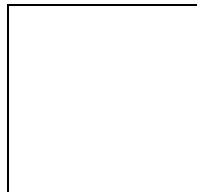


, магнітний опір якоря

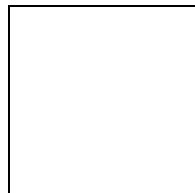


, два магнітних опори

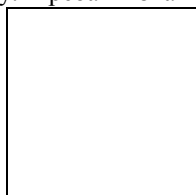
повітряних проміжків



За законом Ома еквівалентний опір цього кола буде:

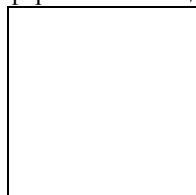


При аналізі магнітних кіл треба або знайти МРС по заданому магнітному потоку чи індукції, або знайти магнітний потік та індукцію по заданій МРС. Прийmemo, що задані всі розміри магнітопроводу та магнітна індукція у повітряному проміжку. Треба визначити МРС котушки. Згідно II закону

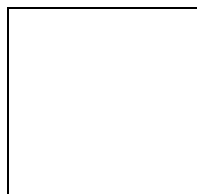


Кірхгофа:

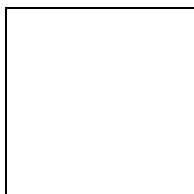
Оскільки потоком розсіювання знехтувано, магнітний потік й магнітна індукція у всіх ділянках кола однакова. Напруженість магнітного поля у всіх феромагнітних ділянках кола однакова і визначається з кривої намагнічування



. Враховуючи закон повного струму визначаємо МРС:



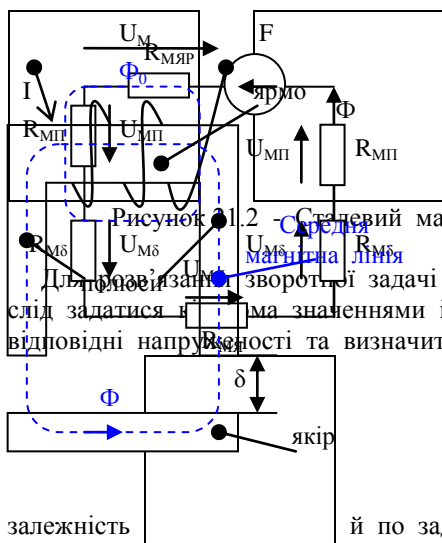
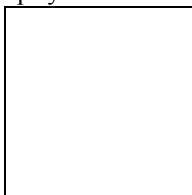
чи



тобто знаючи МРС й задавшись струмом можна визначити кількість витків для певної котушки.

У магнітному колі з повітряним проміжком МРС котушки наближено дорівнює магнітній напрузі на повітряному проміжку, тому при розрахунках магнітними напругами на феромагнітних ділянках кола можна нехтувати.

При більш точних розрахунках при вираховуванні повітряного зазору - напруженість поля на ділянці з не феромагнітного матеріалу визначається не за кривими намагнічування, а за формулою:



Таким чином, заступна схема магнітного кола повністю аналогічна заступній схемі електричного кола постійного струму. Для аналізу використовуються ті ж самі закони. Тому всі методи розрахунку постійних кіл, можуть бути використані для розрахунку магнітних кіл з врахуванням того що магнітне коло можна вважати лінійним лише при відсутності насичення магнітопроводу.

Якщо магнітне розсіювання відбувається не через повітря, а через магнітне коло, то потрібно враховувати ці втрати магнітного потоку за допомогою коефіцієнта розсіювання, який визначається дослідним шляхом чи за довідниками. Для магнітних кіл лише з феромагнітних матеріалів й з малими повітряними проміжками коефіцієнт розсіювання приймається рівним одиниці.

21.5 Розрахунок розгалужених магнітних кіл

21.5.1 Розгалужене симетричне коло

Розрахувати розгалужене магнітне коло - це по заданому магнітному потоку чи індукції на будь-якій ділянці кола, за розмірами ділянок кола й за кривими намагнічування визначити МРС для отримання заданого магнітного режиму. В основі розрахунку розгалуженого магнітного кола лежать *I* та *II* закони Кірхгофа для магнітних кіл.

На рисунку 21.3 приведено розгалужене симетричне магнітне коло. Магнітний потік Φ , який проходить через середнє осердя, поділяється на дві рівні складові $\Phi/2$, які замикаються через крайні осердя магнітопроводу. Для розрахунку такого кола його поділяють площиною $00'$, яка проходить через середину середнього осердя, на дві частини з однаковими магнітними опорами, тобто з однаковими магнітними потоками $\Phi/2$. МРС в цьому випадку визначається як для нерозгалуженого кола.

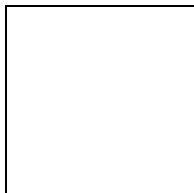
Приклад: Пряма задача. В крайніх стрижнях осердя, яке виконано з електротехнічної сталі, потрібно отримати магнітну індукцію $1,2 \text{ Тл}$. На середньому стрижні розміщена котушка, яка створює МРС. Визначити цю МРС. Розміри магнітного кола приведені на рисунку 21.4

Розв'язання

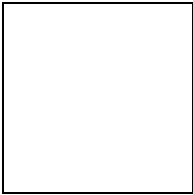
- 1 Розбиваємо контур дві ділянки і визначаємо їх довжину й переріз кожного



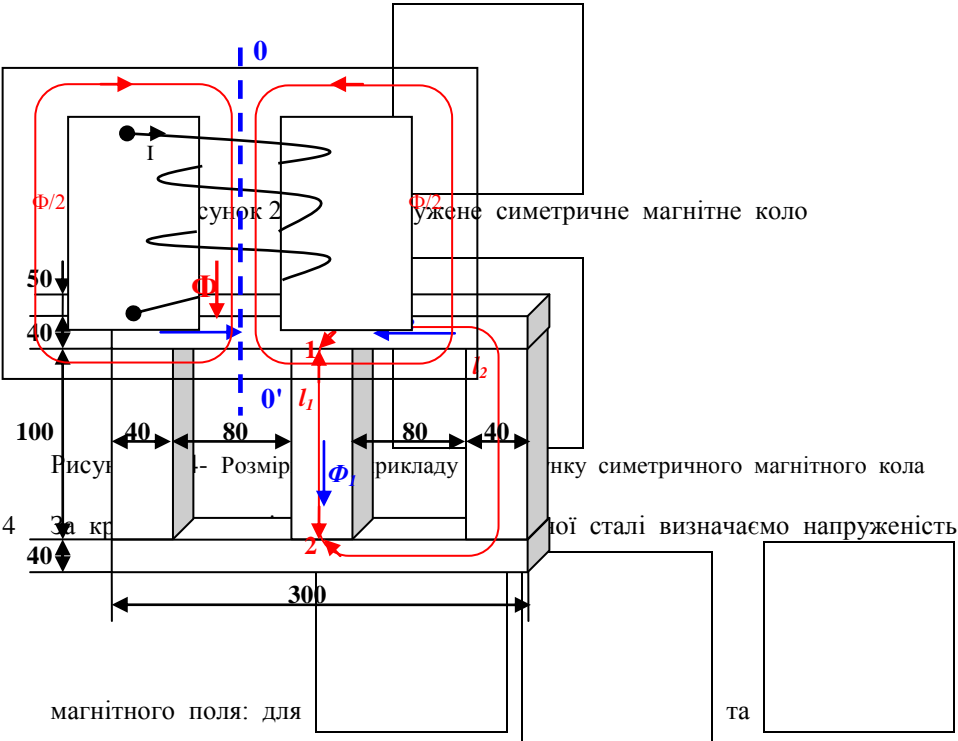
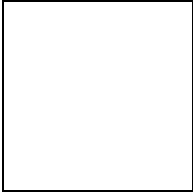
- 2 Магнітний потік крайніх стрижнів:



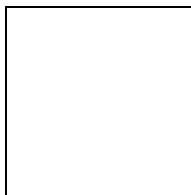
3 Так як магнітне коло симетричне, то магнітний потік середнього стрижня:



, а магнітна індукція:



5 За II законом Кірхгофа МРС:

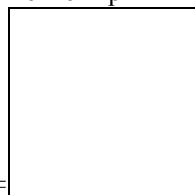


Зворотну задачу (визначити магнітний потік по відомій МРС) можна вирішити методом послідовних приближень, задаючи магнітний потік визначати МРС доки визначене значення МРС не буде достатньо близько до заданої в задачі.

21.5.2 Розгалужене несиметричне коло

Розглянемо розрахунок на прикладі.

Приклад: Осердя виконано з електротехнічної сталі. На середньому стрижні розміщена котушка, яка створює МРС. У правому стрижні є повітряний



проміжок, в якому потрібно створити магнітний потік $\Phi_1 =$ Вб. Визначити кількість витків котушки при струмі $0,5A$. Магнітним розсіюванням можна знехтувати. Розміри магнітопроводу вказані у см на рисунку 21.4

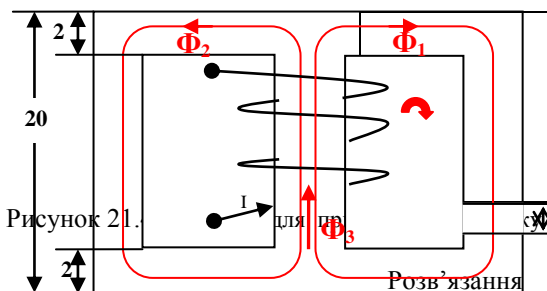
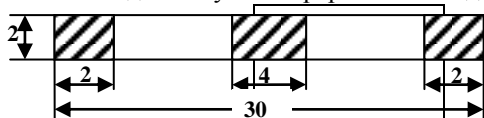


Рисунок 21.4.

схема несиметричного магнітного кола

1 Визначаємо довжину та переріз кожної ділянки кола:



• Правий стрижень:

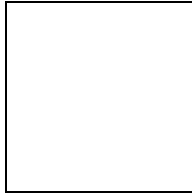


- Лівий стрижень:

- Середній стрижень:

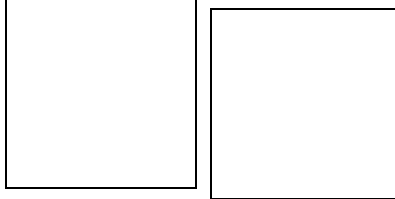
- Повітряний проміжок:

2 Визначаємо магнітну індукцію у правому стрижні:

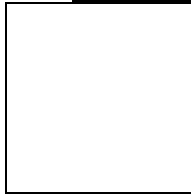


3 За кривою намагнічування електротехнічної сталі визначаємо

напруженість: для

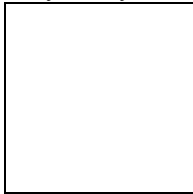


4 Тоді магнітна напруга буде:



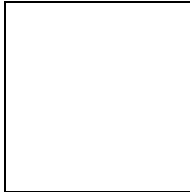
5 Магнітна індукція у повітряному проміжку така же, як і в правому

стрижні:

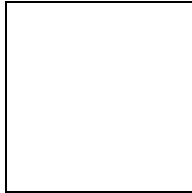


, тому напруженість у повітряному проміжку

визначаємо за формулою:

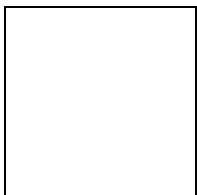


6 Тоді магнітна напруга у повітряному проміжку буде:



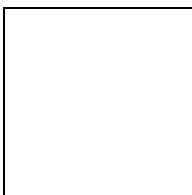
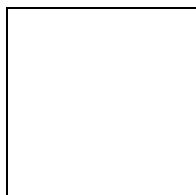
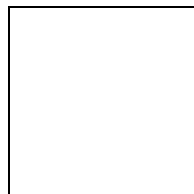
7 Визначаємо напруженість магнітного поля у лівому стрижні за II законом Кірхгофа для зовнішнього контуру, напрямок обходу - за годинниковою

стрілкою:



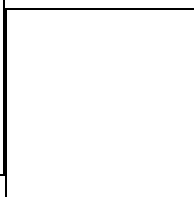
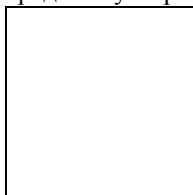
За кривою намагнічування електротехнічної сталі

визначаємо магнітну індукцію у лівому стрижні: для

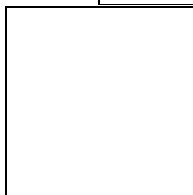


8 Тоді магнітний потік:

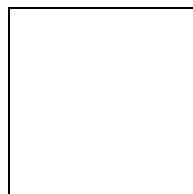
9 Магнітний потік у середньому стрижні визначимо за I законом Кірхгофа:

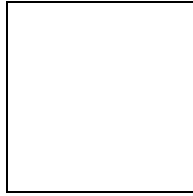


10 За кривою намагнічування

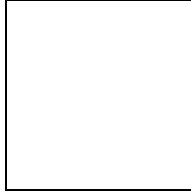


відповідає

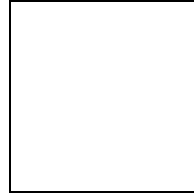




11 Визначаємо МРС магнітного кола склавши рівняння для правого контуру



за II законом Кірхгофа:

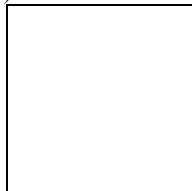


12 Тоді кількість витків котушки буде:

22 Явище самоіндукції

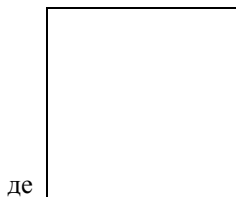
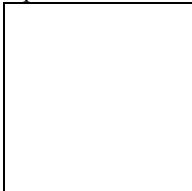
22.1 Індуктивність

При проходженні струму в колі кожний контур чи виток котушки пронизується власним магнітним потоком, який називається потоком самоіндукції (Φ_L). Сума потоків зчеплених з усіма витками котушки (чи потоків самоіндукції усіх витків) називається потокозчепленням:



Вимірюється у *Вб*. Одиниця вимірювання прийнята в ім'я вченого Вебера Вільгельма Едуарда, німецького фізика, автора теорії магнітних диполів, який у 1833 році створив перший у Німеччині електромагнітний телеграф, у 1856 році виміряв швидкість світла, у 1871 році запропонував першу електронну модель атома.

Якщо котушка не має осердя з феромагнітного матеріалу, то поточкозчеплення у котушці пропорційне значенню струму у її витках:

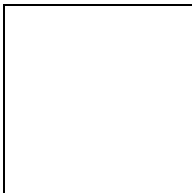


де μ_0 - коефіцієнт пропорційності, який називають коефіцієнтом самоіндукції

катушки або індуктивністю, *Гн*.

Одиниця вимірювання прийнята в ім'я вченого Генрі Джозефа, американського фізика, який у 1828 році створив електромагніт з вантажопідйомністю до 1 тонни, у 1831 році відкрив явище електромагнітної індукції (одночасно з Фарадеєм), винайшов електромагнітне реле, у 1842 році виявив коливний характер розряду конденсатора.

Якщо в контурі відсутні феромагнітні матеріали, то при збільшенні струму пропорційно йому зростає поточкозчеплення. Тобто індуктивність в цьому випадку величина стала й не залежить від струму. Якщо контур має феромагнітні матеріали, то ця пропорційність порушується й індуктивність контуру залежить від струму:



Індуктивність - це один із основних параметрів електротехнічних пристроїв. Позначення індуктивності в електричних схемах вказано на рис.22.1.

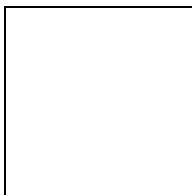
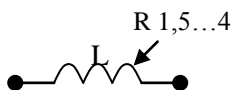


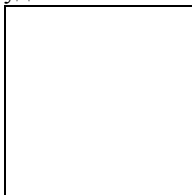
Рисунок 22.1 - Позначення індуктивності в електричних схемах

Індуктивність - це величина, яка характеризує здатність елемента електричного кола створювати магнітне поле при протіканні в ньому струму.

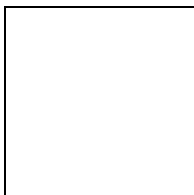
Такий елемент можна виготовити намотавши котушку з кількох витків мідного дроту. Питомий опір міді у 20÷30 разів менший, ніж у манганіну, і якщо переріз дроту зробити великим, омичним опором (R) такої котушки можна нехтувати. Якщо струм постійний і омичний опір котушки дорівнює нулю, то спад напруги на резистивному опорі котушки згідно закону Ома буде теж дорівнювати нулю. Тому в схемах електричних кіл постійного струму такі ідеалізовані індуктивні елементи, тобто їх не враховують й не зображують у схемах за відсутності в них спадів напруги та втрат потужності. Іноді індуктивність така мала, що нею можна нехтувати, але наявність феромагнітних матеріалів збільшує її величину. Колами з великими індуктивностями є обмотки генераторів, двигунів, трансформаторів й котушок зі сталевим осердям. Меншу індуктивність мають прямолінійні провідники. Короткі прямолінійні провідники, лампи розжарювання, електронагрівачі прилади індуктивність практично не мають й поява ЕРС самоіндукції в них не спостерігається. У техніці використовуються різні котушки як зі сталюю так й змінною індуктивністю.

22.2 Індуктивність кільцевої та циліндричної котушок

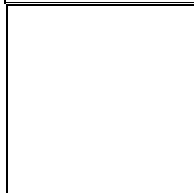
Якщо в кільцевій котушці чи в одношаровій циліндричній котушці, у якої довжина набагато більша за діаметр, з ω витків довжиною l , діаметром циліндричного каркасу D протікає постійний струм, то напруженість магнітного поля усередині котушки з урахуванням, що довжина котушки набагато більша за її діаметр, буде:



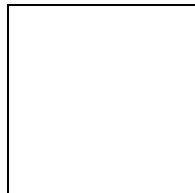
Тоді індукція:



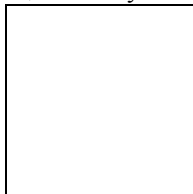
магнітний потік в котушці:



потік зчеплений з витками (потокосцеплення):



Таким чином, індуктивність кільцевої котушки з ω витків довжиною l :

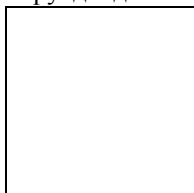


де  - переріз котушки, m^2

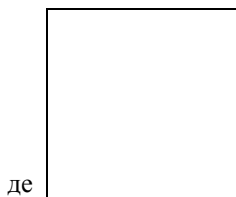
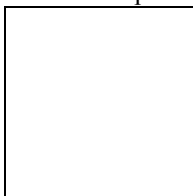
Тобто, індуктивність залежить від розмірів котушки, кількості витків та магнітної проникності осердя котушки, тобто характеризує властивості самої котушки чи контуру.

Якщо довжина котушки мало відрізняється від діаметра її циліндричного каркаса, то у формулу індуктивності вводять поправочний коефіцієнт, який залежить від відношення діаметру до довжини котушки (приводиться у

довідниках). Наприклад, при



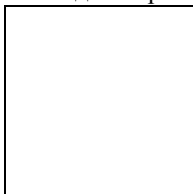
Для збільшення індуктивності котушки на її каркас наносять обмотку з кількох шарів, тоді індуктивність багатошарової циліндричної котушки буде:



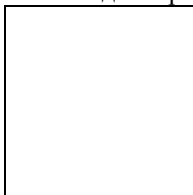
де N - кількість шарів обмотки котушки,



L_0 - індуктивність одношарової котушки, у якої діаметр дорівнює півсумі зовнішнього й внутрішнього діаметрів багатошарової котушки:

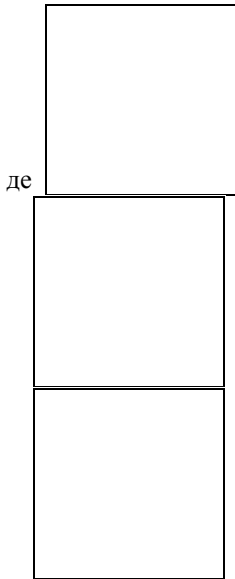
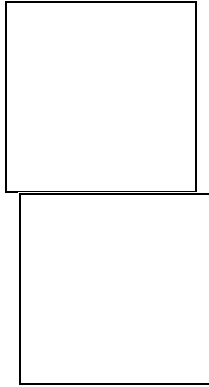


Індуктивність двохпровідної повітряної лінії у зв'язку з великою довжиною



проводів зручно визначати на 1(км) її довжини -





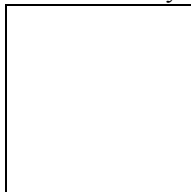
де d - відстань між проводами, m

r - радіус проводів, m

μ - магнітна проникність проводів, яку для усіх проводів, окрім сталєних, можна прийняти 1.

22.3 Самоіндукція. ЕРС самоіндукції

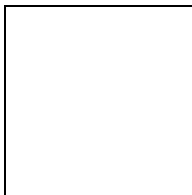
Знаючи індуктивність котушки, кількість її витків й величину струму, який протікає по котушці можна визначити величину магнітного потоку, який



створює цей струм:

Якщо ж по котушці пропустити змінний струм (який змінюється з часом за величиною, позначається i), то створений котушкою потік теж буде змінний і індукуватиме у витках котушки згідно з законом електромагнітної індукції ЕРС, яка в даному випадку називається ЕРС самоіндукції. А явище виникнення у котушці чи контурі індукованої ЕРС під впливом зміни її власного магнітного потоку називається самоіндукцією. Таким чином, ЕРС виникає в усякому замкненому колі, якщо в ньому змінюється струм.

ЕРС самоіндукції прямо пропорційна індуктивності й швидкості зміни струму у колі:

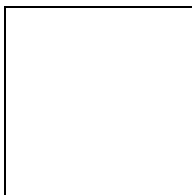
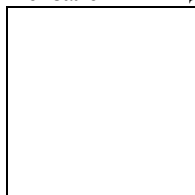


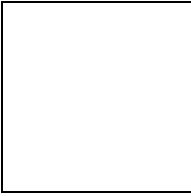
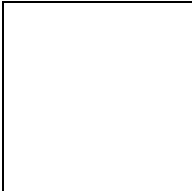
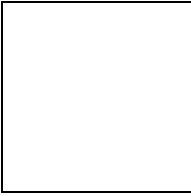
Тобто чим швидше змінюється струм у котушці, тим при рівних інших умовах буде більша в ній ЕРС самоіндукції. Знак мінус у правій частині формули відображає правило Ленца: ЕРС завжди направлена назустріч струму, який її викликає (проти-ЕРС). При збільшенні струму, ЕРС негативна й направлена назустріч струму, тобто протидіючи його зросту. В цьому випадку джерело електроенергії виконує роботу для переборювання опору ЕРС. При зменшенні струму ЕРС позитивна й направлена однаково зі струмом, тобто протидіючи його зменшенню. В цьому випадку енергія магнітного поля переходить в енергію електричного поля, яка витрачається у даному колі.

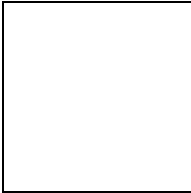
22.4 Нелінійна котушка індуктивності

При незмінній магнітній проникності матеріалу магнітопроводу потікозчеплення пропорційно струму і індуктивність стала й не залежить від

струму. Це наглядно показує вебер - амперна характеристика
рис 12.2(1):



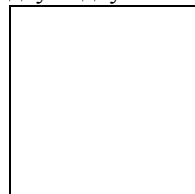
де  ,  ,  - масштаби індуктивності, потокозчеплення і струму відповідно,

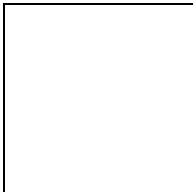
 - кут схилу секущей, проведену через точку, в якій визначають

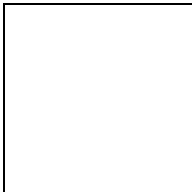
потокозчеплення для певного значення струму, й початком координат.

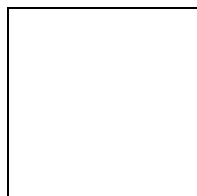
Якщо магнітна проникність матеріалу непостійна (наприклад, сталевий магнітопровід котушки), то вебер - амперна характеристика аналогічна кривій намагнічування, яка нелінійна (рис.12.2(2)). І в цьому випадку відбувається

нелінійна зміна поткозчеплення від струму, тобто:

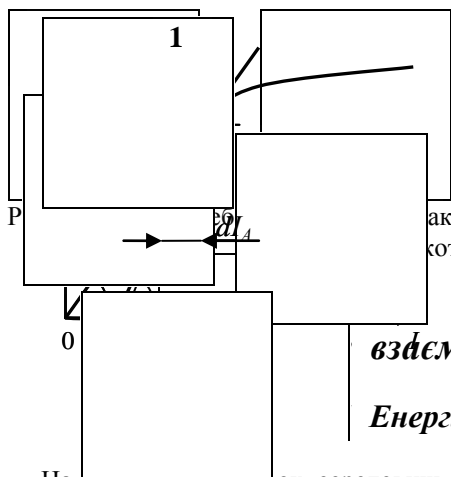


Таким чином,  - називають статичною індуктивністю й визначається для довільної точки.

 - називають диференціальною індуктивністю й використовують для визначення ЕРС самоіндукції для заданої швидкості зміни струму (де



- кут схилу дотичної, проведеної через точку, в якій визначають потокозчеплення для певного значення струму).

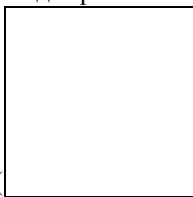


актеристики лінійної (1) та нелінійної (2) котушок індуктивності

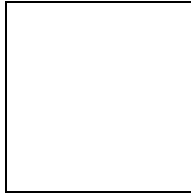
взаємодії

Енергія магнітного поля

На межі розділу двох середовищ з різною магнітною проникністю (наприклад, на межі сталі та повітря) магнітні лінії практично перпендикулярні поверхні розділу. При цьому магнітне поле намагається замкнутися найкоротшим шляхом. Тому, наприклад, електромагніт притягує свій якор до полюсів, виконуючи певну механічну роботу. Логічно уявити, що ця робота виконується за рахунок зникнення магнітного поля у повітряному проміжку і що магнітне поле є носієм енергії. Якщо магнітне поле створюється струмом котушки, то його енергія є результатом роботи джерела живлення котушки з

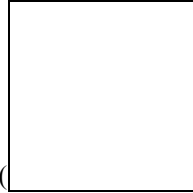
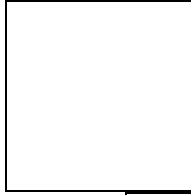


ЕРС. Енергія, накопичена у магнітному полі ($\frac{1}{2} L I^2$, Дж), при умові, що індуктивність стала (тобто коли відсутнє насичення магнітопроводу чи спад магнітної напруги у феромагнітних ділянках магнітопроводу значно менший від спаду магнітної напруги у повітряному проміжку):



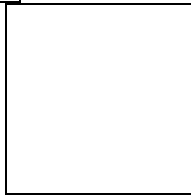
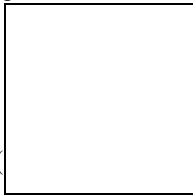
Отже, індуктивність спричинює інерційність магнітного поля. Як струм через індуктивність не може змінитися стрибком, так і магнітне поле не може виникати чи зникати миттєво.

Якщо підставити значення індуктивності у цю формулу, то енергія магнітного поля кільцевої котушки буде:



Тоді магнітна енергія до одиниці об'єму () чи щільність енергії

магнітного поля () буде:



Ця формула може бути використана як для однорідного, так і для неоднорідного магнітного поля.

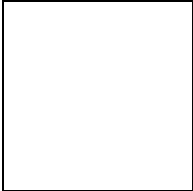
23.2 Взаємодукція. ЕРС взаємодукції

Два контури чи котушки називаються індуктивно чи магнітно зв'язаними, якщо частина магнітного потоку, створеного струмом першого контуру,

пронизує другий контур, а частина магнітного потоку, викликаного струмом другого контуру, пронизує перший контур.

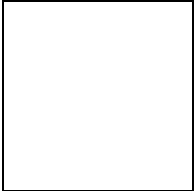
Якщо по індуктивності 1 протікає струм він створює магнітний потік, який частково пронизує біля розміщену індуктивність 2 й наведе там ЕРС. Якщо друга котушка буде замкнена, то по ній почне протікати струм.

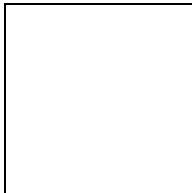
Частина потоку, яка створена струмом першої котушки і пронизує другу котушку, називається потоком взаємної індукції (взаємоіндукції) й утворює з

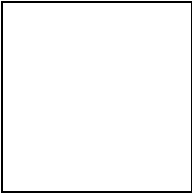
витками другої котушки потікозчеплення: , яке пропорційне струму першої котушки. Відношення потікозчеплення другої котушки до струму першої котушки, який породжує це потікозчеплення, називається

взаємною індуктивністю котушок (контурів) - .

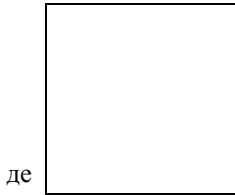
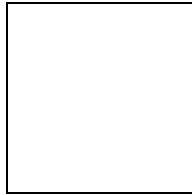
І навпаки, при протіканні струму по другій котушці утворюється магнітний потік, частина якого пронизує першу котушку й наведе там ЕРС. Якщо перша котушка буде замкнена, то по ній почне протікати струм. Потік взаємної

індукції: . А взаємна індуктивність котушок:





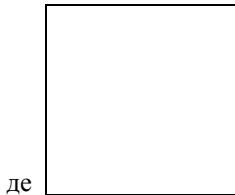
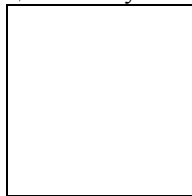
Взаємна індуктивність, також як індуктивність вимірюється в G_n , залежить від кількості витків котушок, їх розмірів, конфігурації, взаємного розміщення й магнітної проникності середовища і не залежить від того, з якої сторони її визначати:



де k - коефіцієнт зв'язку, залежить від взаємного розміщення котушок

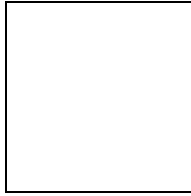
(чим котушки ближче одна до одної, тим коефіцієнт більше).

Взаємна індуктивність двох кільцевих котушок:

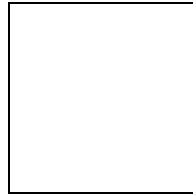


де r - відстань від центру котушки до середньої магнітної лінії,

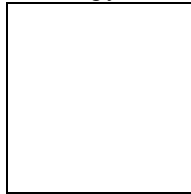
Явище індукування ЕРС в одному колі (котушці) при змінні струму в іншому колі (котушці) називається взаємною індукцією. ЕРС, яка виникає в цьому випадку, називається ЕРС взаєміндукції:



Тобто, чим скоріше змінюється струм у первинній котушці, тим більше величина ЕРС взаємоіндукції у вторинній котушці. Напрямок ЕРС взаємоіндукції визначають за правилом Ленца: ЕРС взаємоіндукції створює струм у другій котушці, який у свою чергу створює власний магнітний потік, який протидіє зміні потоку, який створює струм первинної котушки. При збільшенні струму i_1 магнітний потік Φ_2 , створений індукованим струмом i_2 , направлений протилежно магнітному потоку Φ_1 . І навпаки, при зменшенні струму i_1 магнітний потік Φ_2 направлений у бік зменшуємого магнітного потоку Φ_1 для його підтримки.

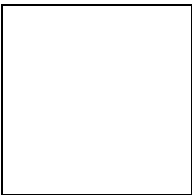


Якщо перший контур з індуктивністю L_1 і опором R_1 підключити до джерела з напругою U_1 , а другий - до джерела U_2 , то згідно з

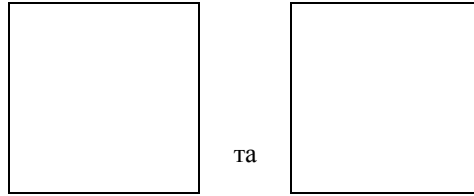


II законом Кірхгофа:

де знак «+» відповідає згідному вмиканню котушок,
«-» - зустрічному вмиканню котушок.

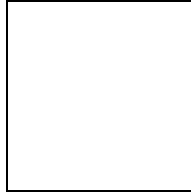


Для позначення згідного та зустрічного вмикання початок котушок (струм протікає від початку котушки) позначають однаковими знаками (наприклад зірками). Тобто, напруга на затискачах контурів буде:



та

Енергія, накопичена у магнітному полі обох контурів:



Таким чином, загальна енергія системи може бути більша чи менша за суму енергії магнітних полів окремих контурів, але кінцево, завжди більша за нуль.

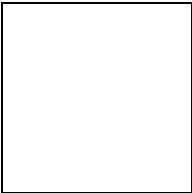
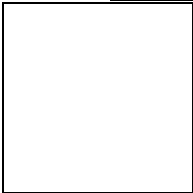
Явище взаємодукції використовують для збільшення й зменшення напруги у трансформаторах чи передачі енергії з одного електричного кола в інший. Іноді, це явище небажано. Наприклад, при проходженні двох ЛЕП поруч може наводитися ЕРС, що створює перешкоди у роботі ліній зв'язку, при ремонті тощо.

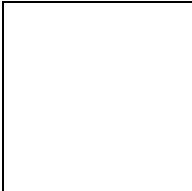
23.3 Принцип дії трансформатора

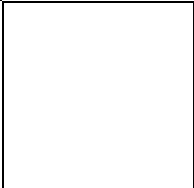
Явище взаємодукції покладено в основу дії трансформаторів. В них потік розсіювання дуже малий завдяки феромагнітному осерддю, яке підсилює та направляє магнітний потік, але із-за нього взаємна індуктивність стає непостійною величиною, тому її використовують лише при розрахунках трансформаторів без феромагнітного осердя (наприклад, повітряних трансформаторів для струмів високої частоти).

Трансформатор - це електромагнітний пристрій, призначений для перетворення одного класу напруги в інший однакової частоти. Передача енергій від первинної обмотки, ввімкненої до мережі живлення, до вторинної обмотки здійснюється змінним магнітним потоком, створеним у сталевому осердді. Найпростіший однофазний трансформатор (рис.13.1) складається з двох обмоток та сталевго осердя.

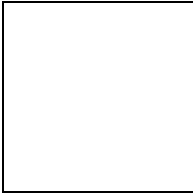
Якщо до первинної обмотки такого трансформатора прикласти змінну ЕРС e_1 , то в ній потече змінний струм i_1 , що створює магнітний потік, який можна розкласти на потік розсіювання Φ_{01} та потік у магнітопроводі Φ_m , який замикаючись по сталевому осерддю трансформатора перетинає витки вторинної обмотки. Тоді згідно з законом електромагнітної індукції цей потік, зчеплений з обмотками трансформатора, індукує в обох обмотках ЕРС:

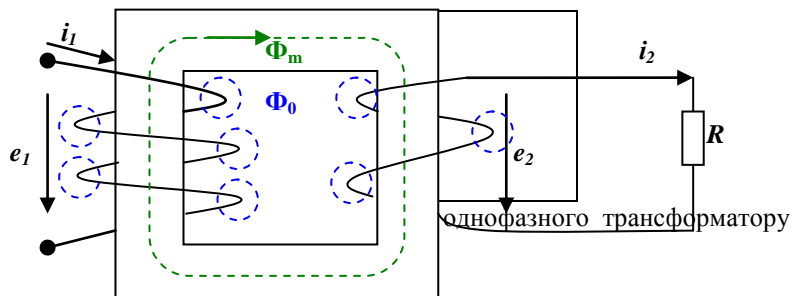
де  та  - кількість витків первинної та вторинної обмоток відповідно,

 - амплітуда магнітного потоку, $B\phi$

 - частота напруги живлення, f

Отже, на виводах вторинної обмотки трансформатора створюється змінна напруга U_2 , якщо коло навантаження замкнено, то у колі потече струм i_2 .

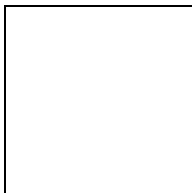
Співвідношення  називають коефіцієнтом трансформації трансформатора.



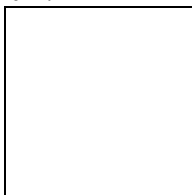
24 Принцип дії електричних машин

24.1 Перетворення механічної енергії в електричну (принцип дії генератора)

Якщо замкнути прямолінійний провід довжиною l , який розміщений у однорідному магнітному полі перпендикулярно вектору магнітної індукції B , зовнішнім колом з опором R (рис.14.1), то при русі проводу з постійною швидкістю v перпендикулярно магнітним лініям у ньому індукується незмінна ЕРС і в замкнутому колі виникає постійний струм. На провід зі струмом у магнітному полі діє електромагнітна сила:



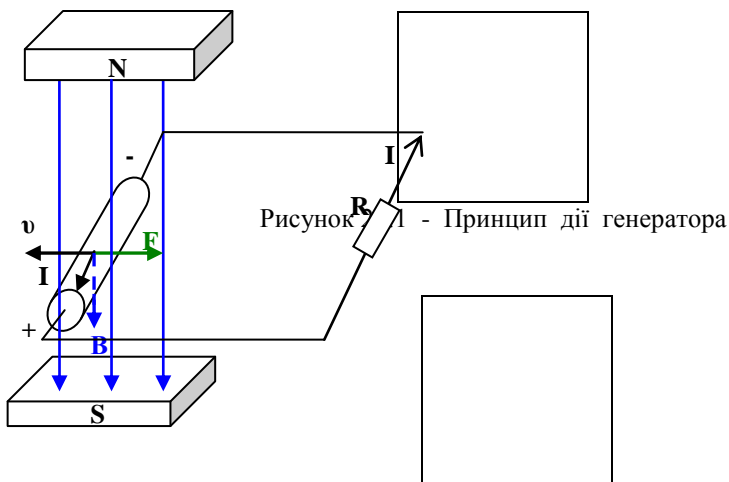
Напрямок цієї сили, визначений за правилом лівої руки, протилежний напрямку вектора швидкості, тобто вона є гальмовою. Для переборювання цієї сили, тобто для руху проводу, потрібна зовнішня сила, рівна гальмовій силі й направлена їй назустріч. Тобто для руху проводу потрібний первісний двигун, який розвиває механічну потужність:



Таким чином, потужність, яку розвиває двигун, дорівнює електричній потужності кола.

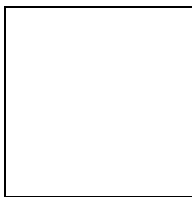
Висновок: при русі в магнітному полі під дією зовнішніх сил замкнутого на зовнішнє коло провідника, який пересікає магнітні лінії, відбувається перетворення механічної енергії в електричну. Електричні машини, в яких відбувається перетворення механічної енергії в електричну, називаються

електричними генераторами. Тобто принцип дії генераторів заснований на законі електромагнітної індукції (явищі індукування ЕРС у провідниках, які рухаються у магнітному полі). Генератори використовують як джерела живлення.

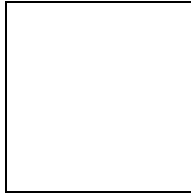


24.2 Перетворення електричної енергії в механічну (принцип дії двигуна)

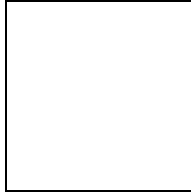
Якщо прямолінійний провід довжиною l , який розміщений у однорідному магнітному полі перпендикулярно вектору магнітної індукції B , приєднати до джерела живлення з постійною ЕРС і внутрішнім опором R_0 (рис.14.2), то по проводу почне протікати струм. На провід зі струмом у магнітному полі діє електромагнітна сила:



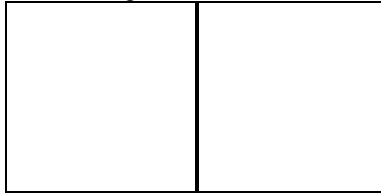
Напрямок цієї сили визначається за правилом лівої руки. Під дією цієї сили провід рухається з швидкістю v , тому в ньому індукується ЕРС, яка направлена назустріч струму (за правилом правої руки). Значення зустріненої ЕРС буде:



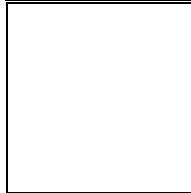
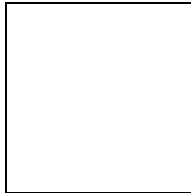
Якщо враховувати опір проводу й використати II закон Кірхгофа:



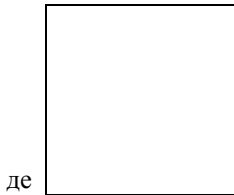
Так як напруга на затискачах джерела:



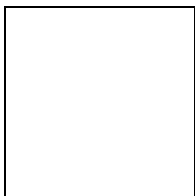
Якщо помножити отримане рівняння на струм, визначимо електричну потужність:



тобто



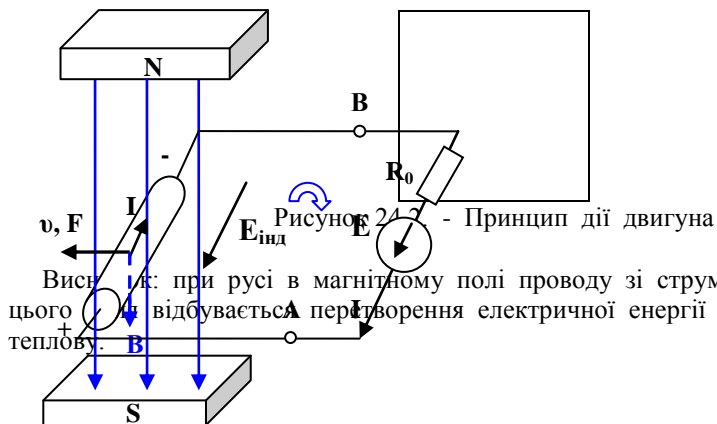
де - механічна потужність, Bm



- потужність теплових втрат у проводі згідно закону

Джоуля –

Ленца, $Вт$



Список літератури

1. Евдокимов Ф.Е. Общая электротехника. - М: Высшая школа, 1987. - 352 с.
2. Попов В.С. Теоретическая электротехника. - М: Энергоатомиздат, 1990. - 544 с.
3. Мансуров Н.Н., Попов В.С. Теоретическая электротехника. - М: Энергия, 1968. - 576 с.
4. Данилов И.А., Иванов П.Т. Общая электротехника. - М: Высшая школа, 1987. - 352 с.
5. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Підручник. - Львів: Афіша, 2001. - 424 с.

