

М.О. Моклюк
А.М. Сільвейстр

**ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА.
Електрика і магнетизм**

Вінниця- 2014

УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73
М

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського

Протокол № ____ від « ____ » _____ 2014 р.

Моклюк М.О. Загальна фізика. Електрика і магнетизм: навчальний посібник / М.О. Моклюк, А.М. Сільвейстр. – Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2014. – 222с.

Рецензенти:

Січкарь Тарас Григорович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної і прикладної фізики Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова

Білюк Анатолій Іванович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського.

Навчальний посібник призначений для аудиторної та самостійної роботи студентів в умовах модульно-рейтингової системи навчання та оцінювання знань студентів. До посібника включено робочу програму навчальної дисципліни, перелік основних понять та законів розділу, загальні методичні поради при аналізі та розв'язуванні задач, перелік основних лабораторних робіт з розділу загального курсу фізики «Електрика і магнетизм».

Навчальний посібник складено на основі галузевого стандарту вищої освіти України та відповідно до діючої програми загального курсу фізики для фізичних спеціальностей вищих педагогічних навчальних закладів.

Для викладачів та студентів фізико-математичних спеціальностей вищих педагогічних навчальних закладів.

Посібник розглянуто і схвалено на засіданні кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії

Протокол № 6 від 18 грудня 2013 року

Посібник розглянуто і схвалено на засіданні навчально-методичної комісії Інституту математики, фізики і технологічної освіти

Протокол № 6 від 20 січня 2014 року

ISBN

© ТОВ «Нілан-ЛТД», 2014
© Моклюк М.О., Сільвейстр А.М., 2014

ЗМІСТ

Передмова	4
1. Робоча програма дисципліни «Загальна фізика. Електрика і магнетизм»	9
1.1. Опис навчальної дисципліни	9
1.2. Мета та завдання навчальної дисципліни	9
1.3. Програма навчальної дисципліни	11
1.4. Структура навчальної дисципліни	14
1.5. Теми семінарських занять	14
1.6. Теми практичних занять	14
1.7. Теми лабораторних занять	15
1.8. Самостійна робота	16
1.9. Індивідуальні завдання	17
1.10. Методи навчання	17
1.11. Методи контролю	17
1.12. Розподіл балів, які отримують студенти	18
1.13. Методичне забезпечення	20
1.14. Рекомендована література	20
1.15. Інформаційні ресурси	21
2. Теоретичні основи розділу «Електрика і магнетизм»	22
2.1. Основні поняття розділу	22
2.2. Фізичні величини та одиниці їх вимірювання	81
2.3. Закони і закономірності розділу	117
3. Задачі з загальної фізики, методичні рекомендації для їх аналізу і розв'язування	128
3.1. Змістовий модуль № 1. Електрика	130
3.1.1. Електростатика	130
3.1.1.1. Вказівки до розв'язку задач з електростатики	130
3.1.1.2. Практичні заняття	132
3.1.1.3. Задачі для самостійного розв'язування з електростатики	136
3.1.2. Постійний струм	160
3.1.2.1. Вказівки до розв'язку задач на постійний струм	160
3.1.2.2. Практичні заняття	161
3.1.2.3. Задачі для самостійного розв'язування на постійний струм	165
3.2. Змістовий модуль № 2. Магнетизм	178
3.2.1. Електромагнетизм	178
3.2.1.1. Вказівки до розв'язку задач з електромагнетизму	178
3.2.1.2. Практичні заняття	180
3.2.1.3. Задачі для самостійного розв'язування з електромагнетизму	185
Питання для контролю	210
Література	214

Передмова

Пізнання людиною навколишнього світу розпочинається з дня її народження, адже це необхідно для її існування, для виживання у складних природних умовах, розвитку та біологічного удосконалення. Наукові знання, роль яких стрімко зростає, одночасно підвищує роль людини у виробничій діяльності. Людський чинник тепер становить активний, творчий елемент у виробничій діяльності суспільства.

Фізика, як будь-яка експериментальна наука, оперує певними категоріями, поняттями, має притаманну лише їй термінологію. Фізика займає провідне місце у системі природничих наук, тому основні її поняття, категорії і закони досить тісно пов'язані з філософією.

Важливе світоглядне, політехнічне значення при вивченні фізики займає розділ «Електрика і магнетизм». Тому опанування навчального матеріалу даного розділу має неабияке значення для сприйняття фізичного змісту природи...

Запропонований навчальний посібник призначений для аудиторної та самостійної роботи студентів в умовах модульно-рейтингової системи навчання та оцінювання знань студентів з даного розділу.

Мета даного посібника—дати стисле тлумачення змісту фізичних понять, законів, які вивчаються в курсі фізики з розділу «Електрика і магнетизм», адресувати читача до літературних джерел для поглибленого і детального вивчення конкретних питань, сприяти розвитку у студентів умінь використовувати здобуті знання на практиці, зокрема, під час розв'язування фізичних задач.

Розділ «Електрика і магнетизм» складається з змістових модулів, які є логічно завершеними частинами навчального матеріалу. Модулі включають навчальні елементи, зміст яких визначається з урахуванням специфіки завдань навчання фізики. Змістові модулі структуровані таким чином, щоб студенти мали можливість максимально використати в своїй самостійній діяльності знання і уміння, набуті під час попереднього періоду навчання. Таке структурування забезпечує реалізацію варіативної складової навчального процесу, яка виражається в індивідуальному змісті навчання для кожного студента з урахуванням особистісної орієнтації та рівня розвитку власних здібностей.

Вивчення дисципліни передбачає наступні види діяльності студентів:

- *пізнавальна діяльність*: інтелектуальні розумові дії, спостереження, дослід, усвідомлення проблеми, висування гіпотез, побудова моделей;
- *загально-навчальна діяльність*: пошук інформації, робота з літературою та іншими джерелами інформації, навички спілкування в колективній діяльності;
- *особистісно-реалізуюча діяльність*: пошук індивідуального змісту і цілей навчання фізики, особистісне розуміння фундаментальних понять і

категорій, вибір індивідуального темпу навчання, самостійне визначення цілей, індивідуальний вибір додаткової тематики, індивідуальні обґрунтовані позиції, саморегуляція, самоаналіз і самоконтроль власної діяльності.

Досягнення навчальних цілей кожного модуля забезпечується в процесі спільної діяльності викладача і студентів, яка включає такі елементи:

- систематизацію і узагальнення студентами знань і умінь, запропонованих для самостійного опрацювання;
- проведення викладачем консультацій, які забезпечують студентам можливість своєчасного розв'язання навчальних проблем, що виникають у них у процесі роботи над модулем;
- узагальнення навчального матеріалу модуля під час лекцій, де розглядаються питання методологічного характеру, а також визначаються завдання підвищеної складності, виконання і деталізація яких здійснюється під час практичних і лабораторних занять та в процесі самостійної діяльності.

Після закінчення роботи над модулем студенти проходять підсумковий контроль згідно рейтингової системи із застосуванням інтегративної методики оцінювання навчальних досягнень.

Основне завдання викладача на початку вивчення кожного модуля полягає у підготовці студентів до продуктивної самостійної діяльності, яка має відповідати рівню розвитку їх особистісних якостей, специфіці навчального матеріалу модуля, а також особистісній орієнтації навчання. Для ефективної реалізації цього завдання викладачу необхідно забезпечити усвідомлення студентами тих питань змісту навчального матеріалу модуля, які мають методологічний характер і спрямовані на формування в студентів сучасних уявлень про фізичну картину світу, методи наукового пізнання, історію розвитку фізичних теорій тощо.

Навчальний матеріал, охоплений модулем, має бути настільки завершеним, щоб існувала можливість конструювати єдиний зміст навчання, що відповідав би комплексній меті окремих тем. Відповідно до змісту навчального матеріалу модуля слід інтегрувати різні види і форми навчання, підпорядковані досягненню поставленої дидактичної мети.

Кожний змістовий модуль, як правило, супроводжується комплексом різноманітних дидактичних засобів навчання, що забезпечують наочність матеріалу і сприяють досягненню конкретних цілей навчання. Модулі, що вміщують цільову програму дій, банк інформації та методичних вказівок для її засвоєння, змінюють характер взаємостосунків між викладачами і студентами. Модульна технологія навчання загальної фізики включає три компоненти: змістовий, організаційний і контрольний-оцінювальний з його стимулюючою функцією.

Від студентів вимагається продемонструвати знання кожної із змістових одиниць перед тим, як перейти до вивчення наступної. Спочатку навчання зорієнтоване на засвоєння головного - базових елементів знань курсу фізики і найважливіших алгоритмів дій. Другим етапом є розвиваюче навчання, що базується на творчій самостійній діяльності студентів. Організаційний компонент технології засвоєння змісту навчальних модулів із курсу загальної фізики є сукупністю різноманітних форм і методів організації навчального процесу: лекційних, семінарських, практичних і лабораторних занять.

Проведення *практичних занять* із загальної фізики має *наметі*:

- поглиблення, розширення і засвоєння теоретичного матеріалу; створення проблемної ситуації;
- реалізація дидактичного принципу взаємозв'язку навчання з практикою; розширення наукового світогляду студентів;
- розвиток логічного, творчого і самостійного мислення; набуття досвіду оцінки меж застосовності фізичних залежностей за різних конкретних умов;
- набуття умінь і навичок практичного застосування наукових знань; розвиток і виховання найважливіших функцій особистості: мислення, волі, характеру;
- розвиток уміння самостійної роботи та її активізації;
- навчання методам наукового пізнання;
- формування і розвиток у студентів діалектичного мислення і специфічного "фізичного" мислення;
- розкриття естетичного та логічного в фізиці: дивної стрункості і краси, чіткості і строгості, вишуканості багатьох її рішень і прийомів;
- використання практичних занять як одного з ефективних прийомів перевірки свідомого, глибокого, міцного засвоєння знань;
- закріплення, узагальнення і повторення навчального матеріалу.

В результаті проведення практичних занять студенти повинні:

знати:

- структурні особливості різних типів фізичних задач;
- методи розв'язування фізичних задач;
- загальну методику розв'язування фізичних задач із використанням аналітичного, графічного, табличного, синтетичного й аналітико-синтетичного методів;
- зміст збірників задач із загальної фізики вищої школи і методичних посібників із розв'язування фізичних задач;
- освітнє і виховне значення розв'язування задач з фізики в середній школі;

уміти:

- здійснювати різні способи подання фізичних задач, зокрема,

малюнком, графіком, схемою, системою рівнянь, моделлю, спостереженням, експериментом, скороченим письмовим записом;

- розкривати фізичний зміст задачі;
- раціонально записати умову задачі;
- відшукувати і вводити додаткові умови;
- проводити пошуки шляхів розв'язування задачі і складати загальний план розв'язку;
- вибирати раціональний спосіб розв'язку задачі;
- ставити і давати відповіді на запитання як часткового, так і загального характеру;
- проводити аналіз та оцінку здобутих результатів;
- складати задачу із заданої теми з використанням сучасних знань;
- розв'язувати експериментальні задачі;
- використовувати в процесі розв'язування задач сучасні засоби навчання;
- реалізовувати цілі і завдання розв'язування задач з фізики в середній школі.

Метою проведення лабораторних занять є:

- поглиблення теоретичних знань студентів, формування розуміння ролі експерименту у фізичній науці;
- широке і поглиблене знайомство з матеріальними засобами вимірювань у фізиці;
- засвоєння основних принципів і методів вимірювань у фізиці, культури проведення експериментів;
- розвиток спостережливості, конструктивного мислення, активізація самостійності у роботі;
- залучення студентів до самостійної навчально-наукової роботи.

В результаті проведення лабораторних занять студенти повинні *знати:*

- методи емпіричного пізнання об'єктивної дійсності;
- сутність і методи реалізації експерименту;
- фізичні величини, їх класифікацію; одиниці фізичних величин, їх класифікацію;
- основні методи вимірювань у фізиці;
- характер зміни похибок вимірювань і методи їх оцінок;
- основні правила виконання математичних операцій з наближеними числами;
- основні правила графічного подання результатів експерименту;
- вимоги до питань охорони праці і техніки безпеки під час роботи у фізичних лабораторіях вищого навчального закладу та шкільному фізичному кабінеті;
- освітні і виховні завдання лабораторних робіт і фізичних

практикумів у середній школі;

уміти:

- провести оцінки і реалізовувати оптимальні умови проведення фізичного експерименту, виконання лабораторної роботи;
- забезпечити експериментальний характер шкільного курсу фізики;
- провести аналіз виконання лабораторної роботи, написати висновки про її результати;
- виконати оцінки похибок результатів експерименту;
- графічно подати результати експерименту;
- скласти звіт про виконану лабораторну роботу;
- дати характеристику сучасного фізичного обладнання, фізичних приладів;
- користуватися довідковою літературою;
- забезпечувати виконання завдань лабораторних робіт і фізичних практикумів у школі.

Контрольно-оцінювальний компонент модульної технології навчання реалізується безпосередньо під час лекцій (проблемні запитання), практичних занять (усне і тестове опитування, розв'язування задач), лабораторних занять. Оцінка самостійної роботи проводиться у формі співбесіди і тестування.

Запропонована структура програми змісту курсу загальної фізики і організація навчального процесу за суттю відрізняється від традиційної. Так, за модульної організації програми і навчання фізики всі її поняття, закони, відповідні явища і процеси опановуються й осмислюються іманентно, оскільки входять до структури декількох модулів. Під час засвоєння змісту кожного з модулів вони уявляються як елементи дидактичної клітинки, або як компоненти фізичної теорії, що взаємодіють між собою. Постійне оперування всіма поняттями на різних рівнях узагальнення і конкретизації значно підвищує якість теоретичних знань й умінь їх застосовувати.

Найважливішим результатом модульної технології організації навчання загальної фізики є сприймання її як системи, як гармонії, а не просто як упорядкованого набору розрізнених, не пов'язаних між собою частин цілого.

1. Робоча програма дисципліни «Загальна фізика». Розділ «Електрика і магнетизм»

1.1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни
		денна форма навчання
Кількість кредитів – 7,5	Галузь знань 0402 Фізико-математичні науки	нормативна
	Напрямок підготовки 6.040203 Фізика*	
Модулів – 1	Спеціальність: _____ (код і назва)	Рік підготовки:
Змістових модулів – 2		2-й
Загальна кількість годин - 270		Семестр
		4-й
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 7 самостійної роботи студента – 7	Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр	Лекції
		46 год.
		Практичні, семінарські
		40 год.
		Лабораторні
		48 год.
		Самостійна робота
136 год.		
Індивідуальні завдання: 0 год.		
		Вид контролю: диференційований залік

Примітка.

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної і індивідуальної роботи становить:

для денної форми навчання – 50%:50%

1.2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: підготовка майбутнього вчителя фізики з фізики відповідно до галузевого стандарту вищої освіти.

Завдання: системна інтеграція предметних галузей знань, розвиток умінь експериментально-дослідницької діяльності та творчого потенціалу студента, його здібностей.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

знати:

електричний заряд і механізми електризації, закон Кулона; властивості і характеристики електричного поля; теорема Гаусса та її застосування;

властивості провідників і діелектриків та вплив на них електростатичного поля; будова і характеристики конденсаторів; характеристики і закони постійного струму: сила струму, напруга, опір, густина струму, питома електропровідність, електрорушійна сила, робота, потужність, закон Ома в інтегральній та диференціальній формах, для неоднорідної ділянки і повного кола; закон Джоуля-Ленца; правила Кірхгофа; характеристики і закономірності контактних електричних явищ, закон Відемана-Франца; явище термоелектронної емісії, електронно-променева трубка; закономірності проходження електричного струму в рідинах та їх застосування; електроліти, електролітична дисоціація, закони Фарадея, хімічні джерела струму; механізм провідності газів, процеси в газах: іонізація і рекомбінація, несамоствійний і самоствійний розряди, тліючий розряд, катодне та анодне випромінювання, іскровий розряд, блискавка, коронний розряд, дуговий розряд, плазма; характеристики магнітного поля; закони Ампера, Біо-Савара-Лапласа, закон повного струму, магнітний момент струму, сила Лоренца, ефект Холла; вектор намагнічення, магнітна проникність, діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, магнітний гістерезис, закон Кюрі-Вейса, антиферомагнетики, феримагнетики, магнітомеханічні і механомагнітні ефекти, електромагніти та їх застосування; індукційний струм, закон електромагнітної індукції Фарадея, правило Ленца, електрорушійна сила індукції, індуктивність, енергія магнітного поля струму, густина енергії магнітного поля; характеристики квазістаціонарного (змінного) струму: діючі значення сили струму та напруги, активний, індуктивний та ємнісний опори у колі змінного струму; закон Ома для змінного струму, векторні діаграми, резонанс напруг і струмів, робота і потужність змінного струму; коливальний контур, формула Томсона, диференціальні рівняння власних, згасаючих і вимушених коливань; електромагнітне поле, система рівнянь Максвелла; властивості електромагнітних хвиль; внесок українських учених у розвиток електрики і магнетизму.

вміти:

застосовувати теоретичні основи електрики і магнетизму у навчальному процесі загальноосвітніх навчальних закладів; ставити демонстраційні експерименти з електрики і магнетизму, робити теоретичні узагальнення та вказувати практичні застосування; застосовувати отримані знання для розв'язування задач, користуватися і знати будову: електровимірювальних приладів, мостів постійного та змінного струмів, радіоблоків, напівпровідникових випрямлячів, транзисторів, фотоелементів, осцилографа, електронного мікроскопа, лазера, радіаційних приладів, лічильників електричної енергії, трансформаторів; обирати методи та виконувати розрахунки кіл постійного та змінного струмів; обирати методи та виконувати вимірювання електрорушійної сили, сили струму,

електричної напруги, електричного опору в колах постійного і змінного струмів, температури Кюрі; володіти уявленнями про електродинамічне моделювання процесів в електричних системах за певних умов.

1.3. Програма навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. Електрика

Тема 1. Електричне поле у вакуумі

Вступ. Предмет та методи електрики і магнетизму. Короткий історичний огляд вчення про електрику і магнетизм. Розвиток електроенергетики в Україні. Електростатика. Електричний заряд. Властивості електричного заряду. Два види заряду. Дискретність заряду. Інваріантність і закон збереження заряду. Елементарний заряд. Експериментальне визначення заряду електрона. Найпростіші заряджені тіла: модель точкового і неперервно розподіленого заряду. Взаємодія точкових заряджених тіл. Закон Кулона. Електричне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції. Поле диполя. Потік вектора напруженості. Теорема Гаусса. Робота сил електростатичного поля. Потенціальний характер електростатичного поля. Циркуляція вектора напруженості. Потенціал та різниця потенціалів. Рівняння Пуассона і Лапласа. Потенціал та напруженість поля, створеного точковим зарядженим тілом, системою точкових заряджених тіл, диполем.

Тема 2. Провідники та діелектрики в електричному полі

Розподіл зарядів у провіднику. Провідники в електричному полі. Еквіпотенціальність поверхні провідника. Напруженість поля біля поверхні провідника та її зв'язок з поверхневою густиною заряду. Електризація через вплив. Врахування поля наведених зарядів. Електрофорна машина. Електроємність. Конденсатори. Діелектрики. Полярні і неполярні молекули. Вільні і зв'язані заряди. Поляризація діелектриків. Діелектрична проникність і сприйнятливість, вектор електричного зміщення. Неполярні діелектрики, теорія їх поляризації. Полярні діелектрики, теорія їх поляризації. Електричне поле на межі двох діелектриків. Граничні умови. Теорема Гаусса для поля в діелектрику. Сегнетоелектрики. Електрети. П'єзоелектрики.

Тема 3. Енергія взаємодії зарядів. Енергія електричного поля

Енергія системи нерухомих точкових зарядів, зарядженого провідника, конденсатора. Енергія і густина енергії електростатичного поля. Вектор Умова.

Тема 4. Постійний електричний струм

Рух зарядів в електричному полі, електричний струм. Рівняння неперервності. Умова стаціонарності струму. Закон Ома для ділянки кола. Закон Ома в диференціальній та інтегральній формах. Сторонні сили.

Електрорушійна сила. Закон Ома для неоднорідної ділянки і повного кола. Робота і потужність постійного струму. Закон Джоуля-Ленца. Розгалужені кола, правила Кірхгофа та їх застосування.

Тема 5. Електричний струм у вакуумі, газах та рідинах
Термоелектронна емісія. Залежність струму насичення від температури. Двохелектродні та трьохелектродні лампи і їх застосування. Електронно-променева трубка. Поняття про вторинну та автоелектронну емісії. Електроліти. Електролітична дисоціація. Електропровідність електролітів. Закон Ома для електролітів. Електроліз. Закони Фарадея. Хімічні джерела струму. Використання електролізу. Процеси іонізації і рекомбінації. Несамостійний розряд в газах. Самостійний розряд в газах. Вольт-амперна характеристика газового розряду. Види розрядів (тліючий, дуговий, іскровий, коронний). Блискавка. Поняття про плазму. Використання газових розрядів. Катодні промені.

Тема 6. Електропровідність твердих тіл
Класифікація твердих тіл (провідники, діелектрики, напівпровідники). Електричний струм у металах. Досліди Мандельштама і Папалексі, Толмена і Стюарта. Класична електронна теорія провідності металів. Виведення законів Ома, Джоуля-Ленца. Закон Від мана-Франца. Залежність опору металів від температури. Надпровідність. Поняття про квантову теорію провідності твердих тіл. Провідність напівпровідників. Власна і домішкова провідність напівпровідників. Застосування напівпровідників.

Тема 7. Електричні контактні явища
Робота виходу електрона з металу. Контактна різниця потенціалів. Контактні явища в напівпровідниках. Напівпровідникові діоди і транзистори. Термоелектричний струм. Прямі та обернені термоелектричні явища. Термоелектричні генератори.

Змістовий модуль 2. Магнетизм

Тема 8. Постійне магнітне поле у вакуумі та речовині
Магнітна взаємодія струмів. Закон Ампера. Магнітне поле електричного струму. Індукція і напруженість магнітного поля. Закон Біо-Савара-Лапласа. Магнітне поле прямого, колового і соленоїдного струмів. Циркуляція вектора індукції магнітного поля. Закон повного струму. Контур із струмом у магнітному полі. Магнітний момент струму. Дія електричного і магнітного полів на рухомий заряд. Сила Лоренца. Визначення питомого заряду електрона. Мас-спектрометр. Ефект Холла і його застосування. Електронний мікроскоп. Прискорювачі заряджених частинок. Магнітогідродинамічні генератори. Магнітне поле рухомого заряду. Відносний характер електричного і магнітного полів. Робота при переміщенні провідника зі струмом у магнітному полі. Магнітний потік. Магнетики і намагнічування їх. Вектор намагнічення. Магнітне поле в

магнетиках. Вектор напруженості магнітного поля. Магнітна сприйнятливість і проникність магнетиків. Зв'язок індукції і напруженості магнітного поля в магнетиках. Магнітомеханічні і механомагнітні явища. Досліди Ейнштейна, де Гааза і Барнетта. Діа-, пара- і феромагнетики. Магнітний гістерезис. Роботи Столетова. Точка Кюрі. Постійні магніти. Нові магнітні матеріали. Магнітні кола. Магніторушійна сила. Закони магнітного кола.

Тема 9. Електромагнітна індукція

Досліди Фарадея. Електрорушійна сила індукції. Закон електромагнітної індукції Фарадея і правило Ленца. Вихрові струми. Скін-ефект. Самоіндукція і взаємоіндукція. Електрорушійна сила самоіндукції. Індуктивність. Енергія магнітного поля струму. Енергія і густина енергії магнітного поля.

Тема 10. Змінний квазістаціонарний струм. Квазістаціонарні електричні кола

Отримання змінної ЕРС. Квазістаціонарний струм. Діючі і середні значення струму і напруги. Опір, індуктивність і ємність у колі змінного струму. Закон Ома для кола змінного струму. Векторні діаграми і метод комплексних амплітуд. Резонанс напруг, резонанс струмів. Робота і потужність змінного струму. Передавання електричної енергії. Трансформатор. Електричний коливальний контур. Власні електричні колювання. Формула Томсона. Згасаючі колювання. Вимушені електричні колювання. Резонанс. Добротність і смуга пропускання контуру. Електричні автоколювання. Автогенератор на транзисторі.

Тема 11. Електромагнітне поле та електромагнітні хвилі. Рівняння Максвелла

Вихрове електричне поле. Досліди Роуланда і Ейхенвальда. Електромагнітне поле. Струм зміщення. Система рівнянь Максвелла в інтегральній і диференціальній формах. Плоскі електромагнітні хвилі в однорідному середовищі, швидкість їх поширення. Випромінювання електромагнітних хвиль. Досліди Герца. Вібратор Герца. Енергія електромагнітної хвилі. Потік енергії. Вектор Умова-Пойнтінга. Поняття про системи передачі електромагнітної енергії. Електромагнітні хвилі вздовж проводів. Тиск електромагнітних хвиль. Стоячі хвилі і резонанс у відрізках довгих ліній. Винайдення радіозв'язку. Принцип радіозв'язку і радіолокації. Шкала електромагнітних хвиль.

1.4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	Σ	у тому числі				
		л	п	лаб	інд	с.р.
1	2	3	4	5	6	7
Модуль 1						
Змістовий модуль 1. Електрика						
Тема 1. Електричне поле у вакуумі	22	4	8	4		6
Тема 2. Провідники та діелектрики в електричному полі	14	4	2	0		8
Тема 3. Енергія взаємодії зарядів. Енергія електричного поля	14	2	2	0		10
Тема 4. Постійний електричний струм	40	4	8	18		10
Тема 5. Електричний струм у вакуумі, газах та рідинах	20	4	2	4		10
Тема 6. Електропровідність твердих тіл	16	4	2	2		8
Тема 7. Електричні контактні явища	14	2	2	2		8
Разом за змістовий модуль 1	140	24	26	30		60
Змістовий модуль 2. Магнетизм						
Тема 8. Постійне магнітне поле у вакуумі та речовині	46	8	8	10		20
Тема 9. Електромагнітна індукція	20	4	2	0		14
Тема 10. Змінний квазістаціонарний струм. Квазістаціонарні електричні кола	34	4	2	8		20
Тема 11. Електромагнітне поле та електромагнітні хвилі. Рівняння Максвелла	30	6	2	0		22
Разом за змістовий модуль 2	130	22	14	18		76
Разом	270	46	40	48		136

1.5. Теми семінарських занять (не передбачено навчальним планом)

1.6. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Змістовий модуль 1. Електрика		
1	Взаємодія точкових зарядів. Закон Кулона	2
2	Напруженість поля. Принцип суперпозиції	2
3	Напруженість поля. Теорема Гаусса	2
4	Потенціал електричного поля	2

5	Електроємність. Конденсатори. З'єднання конденсаторів	2
6	Електричне поле в діелектриках. Енергія та густина енергії електричного поля.	2
7	Постійний електричний струм. Закони Ома Опір провідників. З'єднання провідників	2
8	Робота і потужність постійного струму. Закон Джоуля-Ленца.	2
9	Розгалужені кола. Правила Кірхгофа	2
10	Електропровідність твердих тіл	2
11	Контактні явища в металах та напівпровідниках	2
12	Електричний струм в електролітах, газах, вакуумі	2
13	Контрольна робота	2
Разом за змістовий модуль 1		26
Змістовий модуль 2. Магнетизм		
14	Індукція і напруженість магнітного поля	2
15	Взаємодія струмів. Закон Ампера. Сила Лоренца	2
16	Магнітний потік. Робота по переміщенню провідника із струмом в магнітному полі	2
17	Магнітне поле в речовині. Енергія магнітного поля	2
18	Закон Фарадея-Максвелла. Індуктивність, самоіндукція. Змінний струм	2
19	Електромагнітні коливання і хвилі	2
20	Контрольна робота	2
Разом за змістовий модуль 2		14
Разом		40

1.7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Змістовий модуль 1. Електрика		
1	Перевірка теореми Гаусса.	2
2	Моделювання електростатичних полів з використанням електропровідного паперу.	2
3	Вивчення правил Кірхгофа	2
4	Дослідження залежності опору напівпровідників від температури.	2
5	Перевірка закону Ома для повного кола.	2
6	Вимірювання електрорушійної сили методом компенсації.	2
7	Вимірювання великих опорів за допомогою місткових схем (місток Уїтстона).	2
8	Вимірювання малих опорів за допомогою місткових схем (модифікований місток Уїтстона).	2
9	Вимірювання опорів за допомогою вольтметра та	2

	амперметра.	
10	Вивчення будови акумулятора та вимірювання роботи і потужності в електричному колі.	2
11	Зняття ВАХ напівпровідникового діода.	2
12	Розширення меж вимірювання амперметра. Розширення меж вимірювання вольтметра.	2
13	Градуювання вольтметра для вимірювання опорів.	2
14	Вивчення явища термоелектронної емісії і вимірювання роботи виходу електрона.	2
15	Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки.	2
Разом за змістовий модуль 1		30
Змістовий модуль 2. Магнетизм		
16	Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.	2
17	Визначення індукції магнітного поля між полюсами електромагніта за допомогою мілівеберметра.	2
18	Вивчення роботи електронного осцилографа.	2
19	Вимірювання питомого заряду (відношення заряду до маси) електрона методом магнетрона.	2
20	Вивчення лічильника електричної енергії.	2
21	Дослідження роботи трансформатора.	2
22	Вивчення початкової магнітної проникності феритів.	2
23	Визначення логарифмічного декременту згасання коливального контуру.	2
24	Визначення активного опору, індуктивності і ємності у колі змінного струму.	2
Разом за змістовий модуль 2		18
Разом		48

1.8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
Змістовий модуль 1. Електрика		
1	Рівняння Пуассона і Лапласа	5
2	Електрофорна машина	5
3	Сегнетоелектрики. Електрети. П'єзоелектрики	5
4	Рівняння неперервності. Умова стаціонарності струму	5
5	Двохелектродні та трьохелектродні лампи і їх застосування	5
6	Електронно-променева трубка	5
7	Поняття про вторинну та автоелектронну емісії	5
8	Використання газових розрядів	5
9	Виведення законів Ома, Джоуля-Ленца в класичній теорії електропровідності.	5

10	Застосування напівпровідників.	5
11	Напівпровідникові діоди і транзистори.	4
12	Термоелектричні генератори.	4
13	Контрольна робота	2
Разом за змістовий модуль 1		60
Змістовий модуль 2. Магнетизм		
14	Циркуляція вектора індукції магнітного поля	4
15	Закон повного струму	4
16	Мас-спектрометр	4
17	Електронний мікроскоп	6
18	Прискорювачі заряджених частинок	4
19	Магнітогідродинамічні генератори	4
20	Магнітне поле рухомого заряду	4
21	Досліди Ейнштейна, де Гааза і Барнетта	6
22	Нові магнітні матеріали	4
23	Магнітні кола. Магніторушійна сила. Закони магнітного кола	4
24	Векторні діаграми і метод комплексних амплітуд	4
25	Резонанс напруг, резонанс струмів	4
26	Вимушені електричні коливання. Резонанс	6
27	Добротність і смуга пропускання контуру*.	4
27	Електричні автоколивання	4
28	Автогенератор на транзисторі	4
29	Система рівнянь Максвелла в диференціальній формах.	4
30	Шкала електромагнітних хвиль.	4
31	Контрольна робота	2
Разом за змістовий модуль 2		76
Разом		136

1.9. Індивідуальні завдання (не передбачено навчальним планом)

1.10. Методи навчання

Пояснювально-ілюстративні, вербальні, невербальні, інноваційні тощо.

1.11. Методи контролю

Бланкове тестування, комп'ютерне тестування, фізичний диктант, усне опитування, опитування на лабораторних заняттях, розв'язування задач, контрольна робота, екзамен.

1.12. Розподіл балів, які отримують студенти

Розподіл балів за змістовими модулями і темами

Поточне тестування та самостійна робота										Сума
Змістовий модуль 1							Змістовий модуль 2			
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
10	5	15	5	10	5	5	15	8	11	11

Розподіл балів за видами діяльності студентів

№	Вид діяльності	Бали	Кількість робіт	Сума балів
1.	Лекції	0,5	23	11
2.	Практичні заняття	1	20	20
3.	Лабораторні заняття	1	24	24
4.	Контрольна робота	5	2	10
5.	Самостійна робота			15
6.	Залік			20
Нормований рейтинговий бал				100

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	ОцінкаECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90-100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
75-81	C		
67-74	D	задовільно	
60-66	E		
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
1-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

Критерії оцінювання навчальних досягнень студентів	Оцінка ECTS
Студент опанував програмовий матеріал на рівні систематизації і узагальнення, уміло використовує наукову термінологію, самостійно визначає мету дослідження та вказує можливості її реалізації, володіє методами наукового пізнання та проблематикою певної наукової	A

галузі, виявляє евристичні здібності, реалізує комплекс ідей щодо самостійного одержання знань та їх опрацювання, виконує методологічні, організаційні, самоорганізаційні види освітньої діяльності. Встановлює причинно-наслідкові зв'язки між фізичними явищами, вміло розкриває зміст фізичних теорій та наводить дослідні факти, що їх підтверджують, самостійно здійснює аналіз та формулює висновки, застосовує здобуті знання і уміння відповідно до поставлених цілей, виявляє обізнаність із науковими проблемами і має уявлення щодо можливих шляхів їх розв'язання. Студент вільно володіє програмовим матеріалом, вміло використовує наукову термінологію, виявляє обізнаність із науковою інформацією, обізнаний із історією розвитку фізики та внеском українських вчених у певну галузь фізичної науки, розуміється у фізичних теоріях та дослідних фактах, що їх підтверджують.	
Студент володіє програмовим матеріалом, науковою термінологією, виявляє обізнаність з фізичними теоріями та дослідними фактами, що лежать в основі їх розробки, розкриває обсяг та зміст фізичних понять, характеризує суттєві ознаки досліджуваних об'єктів, аналізує та узагальнює набуті знання, володіє знаннями з історії розвитку фізичних досліджень в Україні	B
Студент виявляє правильне розуміння фізичного змісту розглядуваних явищ і закономірностей, законів і теорій, визначає умови та границі їх застосування, встановлює взаємозв'язки між фізичними поняттями, виділяє серед них фундаментальні, формулює проблеми з теми, за допомогою викладача робить висновки та систематизує інформацію	C
Студент відтворює значну частину програмового матеріалу, розпізнає фізичні теорії, наводить приклади дослідних фактів, що їх підтверджують, вміє охарактеризувати та проаналізувати основні положення теми, виконує деякі доведення, виведення, за допомогою викладача пояснює фізичні явища та визначає умови, за яких вони відбуваються	D
Студент обізнаний із фізичними явищами, їх причинами та відмінностями, виявляє знання основних положень, правил, закономірностей і законів, вміє їх сформулювати, записує основні формули, розкриває зміст елементарних фізичних понять, володіє репродуктивними способами пізнання	E
Студент виявляє елементарні знання основних понять, закономірностей, правил, законів, обізнаний із фізичними величинами, одиницями їх вимірювання, описує фізичні явища	FX
Студент не опанував змісту навчального курсу в обсязі, передбаченому галузевим стандартом вищої освіти, виявляє обізнаність із деякими елементарними фізичними поняттями, за допомогою викладача розрізняє фізичні явища без їх характеристики, називає окремі фізичні величини та одиниці їх вимірювання	F

1.13. Методичне забезпечення

1. Сільвейстр А.М., Сماشнюк В.С., Моклюк М.О. Основні положення електродинаміки. - Посібник-довідник. Вінниця: ТОВ «Планер», 2011. – 148 с.

2. Сільвейстр А.М., Моклюк М.О. Приклади розв'язування типових задач з курсу загальної фізики. (Задачник-практикум). Вінниця, 2012. – 265 с.

1.14. Рекомендована література

Базова

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: Навчальний посібник. -Т. 2.: Електрика і магнетизм. - К.: Техніка, 2001. - 452 с.

2. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1985. - 576с.

3. Загальний курс фізики. Збірник задач: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. - К.: Вища школа, 1993. - 359 с.

4. Чолпан П.П. Основи фізики: Навч. посібник: Пер. з рос. – К.: Вища шк., 1995. – 488 с.

5. Шут М.І., Сташкевич О.М., Касперський А.В., Січкарь Т.Г. Електрика і магнетизм. - К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2002. - 236 с.

6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. - М.: Наука, 1977. - 687 с.

7. Бушок Г.Ф. та ін. Курс фізики. У двох книгах. Кн. 1.: Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм: Навч. пос. для студ. фіз.-мат. спец. пед. навч. закладів. /Авт.: Г.Ф. Бушок, В.В. Левандовський, Г.Ф. Півень. - 2-ге вид. - К.: Либідь, 2001. - 448 с.

8. Загальна фізика. Лабораторний практикум: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. - К.: Вища школа, 1992. - 509 с.

9. Загальний курс фізики: Збірник задач/ І.П. Гаркуша, І.Т. Горбачук, В.П. Курінний та ін./ За заг.ред. І.П. Гаркуші. - К.: Техніка., 2003. - 560 с.

10. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Высш. школа, 1972. - 466 с.

11. Иродов И.Е., Савельев И.В. и др. Сборник задач по общей физике – М.: Наука. 1979.-319 с.

12. Сборник задач по общему курсу физики. Под ред. Цедрика М.С. М.: Просвещение, 1989 г. - 271с.

Допоміжна

1. Фізика і фізичні методи дослідження. Електрика і магнетизм. (Конспект лекцій)/ Укладачі: Сільвейстр А.М., Моклюк М.О. - Вінниця, 2009. – 112 с.

2. Сільвейстр А.М., Моклюк М.О. Приклади розв'язування типових

задач з курсу загальної фізики. Частина II. Електрика і магнетизм. Оптика. Атомна фізика (Задачник-практикум). - Вінниця, 2012. – 146 с.

3. Грабовський Р.И. Курс фізики: (Для с.-х. ин-тов) – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Школа, 1980. – 607 с.

4. Гуревич Р.С., Солоненко В.І., Сільвейстр А.М. Загальна фізика: основні положення (конспект лекцій): Навч. посібник. – Вінниця : Планер, 2004. - 317с.

5. Детлаф А.А., Яворський В.М. Курс фізики. - М.: Высш. шк., 2000. - 718 с.

6. Дмитрієва В.Ф. Фізика: Навч. посібник /За ред. В.А. Прокоф'єва; Пер. з рос. А.С. Кривошия. – К.: Вища шк., 1992. – 448 с.

7. Гурский И.П. Элементарная физика с примерами решения задач: Учебное пособие, изд. 2-е, перераб. и дополн., М.: Наука, 1976 г. -464 с.

8. Корсак К.В. Фізика: 25 повторювальних лекцій: Навч. посібник. – К.: Вища шк., 1994. – 431 с.

9. Садовий А.І., Лега Ю.Г. Основи фізики з задачами і прикладами їх розв'язування: Навч. посібник. – К.: Кондор, 2003. – 384 с.

10. Шут М.І., Бережний П.В., Касперський А.В. „Мова” фізики. Довідниковий навчальний посібник. К.: 2000. - 37с.

1.15.Інформаційні ресурси

1. Он-лайн система дистанційної підтримки навчання в школах, ліцеях, гімназіях України. – Електронний ресурс. – Режим доступу: www.disted.edu.vn.ua.

2. Сайт «Шкільна фізика». – Електронний ресурс. – Режим доступу: www.sp.bdpu.ua.

3. Сайт кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії. – Електронний ресурс. – Режим доступу: www.vspu.net.ua/metfiz.

2. Теоретичні основи розділу «Електрика і магнетизм»

2.1. Основні поняття розділу

ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Електричний заряд та його властивості

Електричний заряд – властивість частинок матерії або тіл, що характеризує їх взаємозв'язок з власним електромагнітним полем і їх взаємодію із зовнішнім електромагнітним полем; кількісно визначається за силовою взаємодією тіл, які мають електричний заряд. Отже, під *електричним зарядом* розуміють властивість частинок речовини і фізичну величину, що кількісно характеризує цю властивість. Електричний заряд – внутрішня характеристика елементарних частинок, що визначає участь їх в електромагнітній взаємодії. Електричний заряд – це кількісна міра електромагнітної взаємодії.

Електричний заряд є невід'ємною фізичною властивістю деяких мікрочастинок, зокрема, електронів і протонів, що входять до складу атома.

Електрон – негативно заряджена елементарна частинка, що рухається з великою швидкістю навколо ядра атома. Заряд електрона дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Найменшу порцію електричного заряду частинок називають *елементарним зарядом*.

Від грецького янтар – *електрон*. Звідси й походить назва «*електрика*». *Янтар* – скам'яніла смола хвойних дерев, що росли на Землі багато сотень тисяч років тому. *Ебоніт* – каучук із значною домішкою сірки.

Основні властивості електричних зарядів: *двоакість, адитивність, збереження, квантування (подільність), інваріантність по відношенню до різних інерціальних систем відліку*.

Існує два знаки електричних зарядів: *позитивні і негативні*. *Позитивним* був названий заряд, який набуває скляна палочка, потерта об шовк або папір. *Негативним* був названий заряд, який набуває ебонітова палочка, потерта об хутро або шерсть.

Тобто в природі є частинки з електричними зарядами *протилежних знаків*. Якщо знаки зарядів однакові, частинки *відштовхуються*, а якщо різні – *притягуються*.

Найменший (елементарний) позитивний заряд має елементарна частинка «протон», що входить до складу ядра атома. Найменший (елементарний) негативний заряд має елементарна частинка «електрон», що входить до складу атома.

Отже, заряд елементарних частинок – протонів, що входять до складу всіх атомних ядер, називають *позитивним*, а заряд електронів – *негативним*.

Тіла, які мають електричні заряди однакового знака, взаємно відштовхуються, а тіла що мають заряди протилежного знака, взаємно

притягуються.

Якщо у всіх заряджених частинок, що входять до складу даного атома, змінити знак на протилежний, то характер їх взаємодії природно не зміниться. Іншими словами: *всі закони фізики симетричні (інваріантні) до операції заміни всіх позитивних зарядів тіла на негативні і навпаки.*

Макроскопічне тіло *електрично заряджене*, якщо воно містить надлишкову кількість елементарних частинок з одним знаком заряду. Негативний заряд тіла зумовлений надлишком електронів порівняно з протонами, а позитивний – недостатчею електронів.

Між електрично зарядженими частинками діють *електромагнітні сили*. Електромагнітні сили, що існують між зарядженими частинками дуже великі. Дія електромагнітних сил між тілами безпосередньо не виявляється, оскільки тіла в звичайному стані електрично нейтральні. Позитивно й негативно заряджені частинки пов'язані одна з одною електричними силами й утворюють нейтральні системи.

Електризацією тіла називають появу на ньому некомпенсованого електричного заряду.

Якщо створити надлишок (або нестачу) електричних зарядів того чи іншого знака, то тіло буде *наелектризованим*. У процесі електризації тертям одне тіло набуває негативного заряду, а друге – позитивного. В електризації завжди беруть участь два тіла. При цьому електризуються обидва тіла. Тобто, щоб *наелектризувати* електрично заряджене макроскопічне тіло, треба відокремити частину негативного заряду від пов'язаного з ним позитивного. Електризація досягається за допомогою тертя.

Розрізняють *три види електризації*: електризація від дотику (тертя) різнорідних тіл; електризація провідників через дотик до наелектризованого тіла; електризація через вплив.

Електроскоп – пристрій, що дозволяє виявляти на тілі електричний заряд або прилад, за допомогою якого з'ясовують, чи наелектризоване тіло, - ґрунтується на взаємодії заряджених тіл. Від грецьких слів *електрон* і *скопео* – спостерігати, виявляти.

Електроскоп складається із металевого стержня з кулькою на одному кінці і двома легкими листочками на нитках, закріплених до іншого кінця. Все це поміщується в скляний балон з ізолюваною підставкою.

За міною кута розходження смужок електроскопа можна робити висновок, збільшився чи зменшився його заряд.

Електрометр – прилад, за допомогою якого можна виміряти величину заряду та різницю потенціалів. Електрометр нагадує електроскоп, але відрізняється від нього тим, що має металевий корпус. Замість листочків в електрометрі є стрілка і шкала, що проградуєвана в одиницях заряду. Чим більший кут відхилення стрілки електрометра від вертикального стержня,

тим більша величина заряду, що вимірюється.

Дослідно встановлено, що початковий заряд ділиться на частини. Щоб поділити заряд на дуже малі порції треба передавати його дрібним крупинкам металу чи крапелькам рідини. Вимірюючи заряд, добутий на таких маленьких тілах, установили, що можна дістати порції заряду в мільярди мільярдів разів менші. Але в усіх дослідах поділити заряд далі певного значення не вдавалось. Це дало змогу припустити, що існує заряджена частинка, яка має найменший заряд.

Отже, *будь-який електричний заряд кантується, тобто ділиться ціле число разів на елементарні електричні заряди*. Відповідно, *всі електричні заряди, окрім елементарних, дискретні, тобто подільні*. При цьому будь-який заряд q на тіло можна представити як добуток цілого числа N надлишкових або недостатніх електронів порівняно з числом протонів в ядрах атомів цього тіла і елементарного заряду e :

$$q = eN,$$

де e - модуль елементарного заряду; $N = 1, 2, 3, \dots$ - число елементарних зарядів в заряді q .

Існування частинок, що мають найменший електричний заряд доведено дослідами, що проведені радянським ученим А.Ф. Йоффе, і, незалежно від нього, американським ученим Р. Міллікеном.

Електричний заряд – одна з основних властивостей електрона. Електрон – частинка з найменшим негативним зарядом.

Дослід показує, що величина заряду не залежить від швидкості його руху. Один і той же електричний заряд, виміряний в різних інерціальних системах відліку, однаковий. Відповідно, *електричний заряд інваріантний до різних інерціальних систем відліку*.

Сума всіх негативних зарядів у тілі дорівнює за абсолютним значенням сумі всіх позитивних зарядів і тіло в цілому не має заряду: воно *електрично нейтральне*. Іншими словами: якщо два рівних за модулем і протилежних за знаком заряди привести в контакт, то вони *нейтралізуються*.

Тіло *заряджене негативно* тоді, коли воно має надлишкову, порівняно з нормальною, кількість електронів.

Тіло має *позитивний заряд*, якщо в нього недостатньо електронів.

Електрони здійснюють рух під впливом сил поля. Чим більше тіло, якому передають заряд, тим більша частина заряду на нього перейде. На цьому ґрунтується принцип роботи *заземлення*. *Заземлення* – передавання електричного заряду Землі.

За можливістю переміщення по зарядженому тілі під дією електричного поля заряди умовно поділяють на *вільні, зв'язані і сторонні*.

Вільними називають заряди, які пересуваються по всьому тілі, на якому вони знаходяться, під дією електричного поля, в яке тіло поміщено.

Зв'язаними називають заряди, що входять до складу молекул діелектриків (ізоляторів), які під дією зовнішнього електричного поля можуть лише зміщуватися в межах молекули відносно положення рівноваги, але покинути молекулу не можуть.

Сторонніми зарядами називають заряди, що знаходяться на діелектрику, але не входять до складу його молекул, а також заряди поза діелектриком.

В залежності від розмірів тіла, на якому вони знаходяться, заряди поділяють на *точкові* і *протяжні (розподілені)*.

Точковим називають заряд тіла, прийнятого за матеріальну точку. Іншими словами: *точковими електричними зарядами* називають заряди, що розподілені на тілах, лінійні розміри яких значно менші, ніж будь-які інші розміри в даній задачі.

Протяжним (розподіленим) називається заряд тіла, розмірами якого знехтувати неможна. Протяжні заряди умовно поділяють на *лінійні, поверхневі* і *об'ємні*.

Лінійним називається заряд нитки або стержня, діаметр яких нескінченно менший їх довжини.

Для характеристики розподілу заряду вздовж нитки вводять поняття *лінійної густини заряду*.

Для характеристики розподілу заряду по поверхні вводять поняття *поверхневої густини заряду*.

Для характеристики розподілу заряду в деякому об'ємі вводять поняття *об'ємної густини заряду*.

Суть теорії *близькодії* полягає в припущенні про те, що тіла, віддалені одне від одного, завжди взаємодіють за допомогою проміжних ланок (або середовища), які передають взаємодію від точки до точки.

Існування певного процесу в просторі між взаємодіючими тілами, який триває скінчений час, - ось головне, що відрізняє теорію близькодії від теорії дії на відстані.

Ш. Кулон встановив закон взаємодії двох точкових електричних зарядів в кінці XVIII століття. Цей закон був встановлений експериментально з допомогою приладу, створеного Кулоном, який він назвав *крутильними вагами*.

Електричне поле, його характеристики та властивості

У просторі навколо електричного заряду існує електричне поле. Тобто електричне поле є передавачем взаємодії електричних зарядів.

Електричне поле – це матеріальна складова електромагнітного поля, яка діє на заряд, зумовлене зарядами або змінним у часі магнітним полем. Поблизу заряджених тіл поле діє сильніше, а з віддаленням від них слабшає. Основною ознакою наявності електричного поля є те, що на

будь-який заряд внесений у це поле, діє сила.

Сила, з якою електричне поле діє на внесений у нього електричний заряд, називається *електричною силою*.

Розрізняють два основних види електричних полів: *електростатичне* і *вихрове (індукційне)*.

Якщо поле створено нерухомим зарядом і в кожній точці є незмінним у часі його називають *електростатичним полем*, тобто поле нерухомих зарядів.

Вихрове (індукційне) електричне поле – це поле, яке виникає навколо змінного поля при зміні індукції магнітного поля, яке пронизує контур замкнутого провідника.

Електричне поле є складовою частиною єдиного *електромагнітного поля*.

Заряд, який вносять в поле заряду-джерела і з допомогою якого досліджують це поле, ми будемо називати *пробним зарядом* $q_{пр}$. Якщо не вказаний знак пробного заряду, то його прийнято вважати позитивним. Тобто *пробний заряд* – це точковий позитивний заряд, що вноситься в поле.

Пробний заряд повинен бути розташований на тілі дуже малих розмірів, щоб його можна було помістити в дану точку поля.

Основні властивості електричного поля:

1) *джерелом електричного поля є електричні заряди і змінні магнітні поля, з якими дане електричне поле нерозривно пов'язано; джерелом електростатичного поля є тільки нерухомі електричні заряди;*

2) *електричне поле діє на внесені в нього заряди з деякою силою;*

3) *електричне поле поширюється в просторі з скінченною швидкістю,*

яка у вакуумі дорівнює швидкості світла $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$.

Основними характеристиками електричного поля є *вектор напруженості \vec{E}* , який за значенням і напрямом збігається з силою \vec{F} , що діє з боку поля на внесений у певну точку одиничний пробний заряд; *вектор електричної індукції \vec{D}* , який у нескінченних однорідних і ізотропних діелектриках в $\epsilon_0 \epsilon$ раз більший від \vec{E} і є характеристикою поля, що враховує вплив речовини; *потік вектора електричної індукції Φ* ; *потенціал φ* , який є скалярною характеристикою точок поля і чисельно дорівнює роботі, яка витрачається на перенесення одиниці позитивного заряду з розглядуваної точки поля в точку, потенціал якої прийнято за нуль.

Для графічного зображення електричного поля користуються методом ліній напруженості. *Лінією напруженості* називається крива, проведена в електричному полі, дотична до якої в кожній точці збігається з напрямом вектора напруженості. Лінії напруженості не перетинаються. Силкові лінії

електричного поля не замкнуті: вони починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних. Оскільки силові лінії починаються або закінчуються на заряджених тілах, а потім розходяться в різні боки, то *густина ліній більша поблизу заряджених тіл, де напруженість поля також більша.*

Густоту силових ліній вибирати такою, щоб їх кількість при перетині деякої одиничної площадки, перпендикулярної лініям, було рівне напруженості поля в цьому місці.

При графічному зображенні електричних полів з допомогою силових ліній необхідно керуватися наступними правилами:

1) *лінії вектора напруженості електричного поля (силові лінії) починаються і закінчуються на електричних зарядах або йдуть у нескінченність, тобто вони завжди розімкнуті і всередині провідників з нерухожими зарядами не проникають;*

2) *рухомі електричні заряди і змінні магнітні поля пов'язані з вихровими електричними полями, силові лінії яких замкнуті;*

3) *лінії вектора напруженості електростатичного поля (силові лінії) виходять із позитивних зарядів і входять в негативні або йдуть в нескінченність від позитивних зарядів, або входять із нескінченності в негативні заряди;*

4) *лінії вектора напруженості електричного поля (силові лінії) ніколи не перетинаються, так як їх перетин означав би наявність в точці перетину двох різних напрямків одного і того ж вектора напруженості, направлено по дотичній до них, що не має смислу;*

5) *Чим густіше розміщуються лінії вектора напруженості (силові лінії), тим більша напруженість поля в цьому місці; при цьому силові лінії не можуть зливатися, так як це означало б нескінченно велику величину напруженості поля.*

Неоднорідні електричні поля – це поля із змінною від точки до точки напруженістю. Такі поля зображаються або кривими силовими лініями, або непаралельними прямими, або, на кінець паралельними прямими, але розташованими з різною густиною. Відповідно, поля точкових зарядів це неоднорідні поля.

Поле, в кожній точці якого вектор напруженості залишається сталим за величиною і напрямком, називається *однорідним*. Тобто якщо в якійсь області поля $E = const$, то поле в ній називається *однорідним*.

Лінії вектора напруженості (силові лінії) однорідного електричного поля являють собою паралельні прямі, розташовані в просторі з однаковою густиною, тобто знаходяться одна від одної на однакових відстанях.

Електричне поле графічно зображується лініями індукції. *Лінії індукції* являють собою криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора індукції \vec{D} . Напрямок лінії індукції в кожній точці

збігається з напрямом вектора індукції в цій самій точці. Для поля векторів \vec{D} зберігається принцип суперпозиції.

Електричне поле у речовині

За здатністю проводити електричні заряди всі речовини умовно поділяються на *провідники*, *діелектрики* (*непровідники*), *напівпровідники*. Усі метали, ґрунт, тіло людини, розчини солей і кислот у воді – добрі провідники електрики. До непровідників, або діелектриків, належать фарфор, ебоніт, скло, янтар, гума, шовк, капрон, пластмаси, гас, повітря (гази). До напівпровідників належать селен, кремній, германій, закис міді.

Речовини, де електричні заряди вільно пересуваються, називаються *провідниками*. Інакше *провідниками* називають речовини, які проводять електричний струм.

Вільними зарядами називають заряджені частинки, які здатні переміщуватися всередині провідників під впливом електричного поля.

Увесь статичний заряд провідника зосереджений на його поверхні.

Явище електростатичної індукції (або *явище електризації через вплив*) – явище появи електричних зарядів на поверхні провідника, коли піднести до нього заряджене тіло.

Електростатичний захист – ізоляція від електростатичного поля металевою сіткою і т.п., яка оточує, наприклад, тіло людини, електроламп.

Вольтметр – це прилад для вимірювання напруги на полюсах джерела струму або на якій-небудь ділянці кола. Будова вольметра ґрунтується на механічній дії струму.

Щоб відрізнити вольтметр від інших електровимірювальних приладів, на шкалі ставлять букву V . На схемах вольтметр зображають кружечком з буквою V всередині.

Затискачі вольметра приєднують до тих точок кола, між якими треба виміряти напругу. Вольтметр у коло вмикають *паралельно*.

Вольтметр має таку будову, що сила струму, яка проходить через нього, мала порівняно із струмом у колі, тому вольтметр майже не змінює напруги між тими точками, до яких його приєднують.

Всі точки поверхні, перпендикулярної до силових ліній, мають один і той самий потенціал.

Лінія всі точки якої мають однаковий потенціал, називається *еквіпотенціальною лінією*. Геометричне місце точок поля, потенціали яких однакові, називається *еквіпотенціальною поверхнею*, або поверхнею рівного потенціалу ($\varphi = \text{const}$).

Чим більша напруженість електричного поля, тим густіше розташовуються еквіпотенціальні лінії.

Еквіпотенціальна поверхня і лінії напруженості поля в кожній точці

поля взаємно перпендикулярні. Тобто в однорідному електричному полі еквіпотенціальні лінії являють собою паралельні прямі, що перпендикулярні силовим лініям. Поверхня електропровідного зарядженого тіла є еквіпотенціальна. Усі точки всередині провідника мають однаковий потенціал. Робота на переміщення заряду по еквіпотенціальній поверхні дорівнює нулю.

Отже, *силові лінії обриваються на поверхні провідника, впираючись в неї перпендикулярно поверхні, а еквіпотенціальні лінії огинають поверхню провідника, залишаючись перпендикулярними силовим лініям.*

Конденсатором називають систему з двох металевих електродів, розміщених на близькій відстані один від одного і розділених шаром діелектрика. Різноманітні заряджені провідники конденсаторів називають *обкладками*. Слово «конденсатор» у перекладі на українську мову означає «згущувач». У даному випадку – «згущувач електричного заряду».

Під зарядом конденсатора розуміють модуль заряду однієї з обкладок.

За будовою і діелектриками між провідниками розрізняють повітряні, керамічні, слюдяні, паперові, електролітичні конденсатори. Конденсатори бувають *сталі* і *змінні* ємності. За формою – *плоскі, сферичні, циліндричні*. Кожний конденсатор характеризується крім ємності також *пробивною* або *робочою напругою*.

Плоский конденсатор – це конструкція із плоских пластин провідника, розділених діелектриком (повітря, слюда, парафін та ін.).

Діелектрики в електростатичному полі

Діелектрики – речовини, електричні заряди, що надані їм залишаються на тих самих місцях. Так звані *зв'язані* електричні заряди, тобто зв'язані один з одним і не можуть переміщуватися під дією поля по всьому об'єму речовини, як вільні заряди провідника.

Іншими словами: *діелектрики* – це речовини, які не проводять електричний струм. (Від грецького *dia* – через, наскрізь, по англійськи *elec* - електричний).

Тіла, виготовлені з діелектриків, називають *ізоляторами*. Від грецького слова *ізоляро* – відокремлювати.

Діелектрики можна поділити на два класи: *полярні*, що складаються з молекул, у яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються, і *неполярні*, що складаються з атомів або молекул, у яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються. До полярних діелектриків належать спирти, вода та ін.; до неполярних – інертні гази, кисень, водень, бензол, поліетилен тощо.

Якщо діелектрик складається із полярних молекул, то зовнішнім електричним полем вони орієнтуються вздовж ліній поля.

Електричний диполь – це нейтральна в цілому система зарядів (тобто

на одному кінці переважає позитивний заряд, на другому – негативний).

Зміщення позитивних і негативних зв'язаних зарядів діелектрика в протилежні боки називають *поляризацією*.

Поляризація молекул – електронні оболонки в атомах і молекулах зміщуються в напрямку, протилежному \vec{E}_0 (де \vec{E}_0 - напруженість зовнішнього електричного поля).

Поляризація діелектрика – це виникнення в ньому поля \vec{E}_1 зв'язаних зарядів, яке послаблює зовнішнє поле \vec{E}_0 (де \vec{E}_1 - напруженість внутрішнього електричного поля).

Поляризація діелектрика називається *електронною поляризацією*, при якій відбувається зміщення електронних оболонок атомів під дією електричного поля.

Окрім електронної поляризації діелектрики з неполярними молекулами володіють *іонною поляризацією*.

Якщо на одній поверхні діелектрика появляється негативний поверхневий заряд а на іншій поверхні – позитивний, то таке явище називається *орієнтаційною поляризацією діелектрика*.

Діелектрик, внесений в електричне поле, зменшує його напруженість.

Для характеристики електричних властивостей діелектриків введено особливу величину, яку називають *діелектричною проникністю*.

Діелектрики, що мають доменну структуру, називають *сегнетоелектриками*. Назва його походить від слів «сегнетова сіль» - найбільш типового сегнетоелектрика. Всі сегнетоелектрики – кристали.

Властивість зберігати поляризацію і у відсутності зовнішнього електричного поля є самою головною особливістю, що відрізняє сегнетоелектриків від діелектриків.

Явище поляризації діелектриків в результаті механічної взаємодії називається *прямим п'єзоелектричним ефектом*, а діелектрики, що підлягають цьому ефекту називаються *п'єзоелектриками*. П'єзоелектриками є всі сегнетоелектрики, а також деякі інші діелектрики, наприклад, кварц, деякі сорти кераміки. Якщо п'єзоелектрик, внесений в електричне поле, деформується: стискується або розтягується в залежності від напрямку поля відносно його осі симетрії, то такий ефект називається *зворотнім п'єзоелектричним ефектом*.

Явище поляризації діелектрика внаслідок зміни його температури називається *піроелектричним ефектом*, а речовини, що підлягають цьому явищу, - *піроелектриками*. Піроелектричний ефект тісно пов'язаний із зворотнім п'єзоелектричним ефектом. При цьому всі піроелектрики є одночасно і п'єзоелектриками.

Електрети – це діелектрики, отримані штучним шляхом і мають властивість довгий час зберігати на своїй поверхні зв'язані електричні

заряди. До електретів відносяться також і багато некристалічних діелектриків. Електрети, отримані в результаті розплаву діелектрика, називають *термоелектретами*. Перевести діелектрик в електретний стан можна й іншими шляхами: під дією радіоактивного випромінювання певної частоти – *радіоелектрети*; стиском або розтягом – *механоелектрети*; тертям – *трибоелектрети*; світловим випромінюванням – *фотоелектрети* й іншими способами.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Електричний струм та його характеристики

Електричний струм – це потік електрично заряджених частинок або тіл. Хаотичний рух заряджених частинок не утворює електричного струму. Електричний струм має властивість теплової, хімічної і магнітної дії. Розрізняють струм *провідності* і *конвекційний* струм.

Струм провідності – це упорядкований рух носіїв заряду в провідному середовищі.

Конвекційним називається струм, створений електричними зарядами, що рухаються разом з тілом, на якому вони містяться.

За напрям струму в провіднику умовно прийнято напрямок руху позитивних зарядів.

Електричний струм спричиняє такі дії:

- 1) провідник, по якому тече струм, нагрівається (теплова дія струму);
- 2) електричний струм може змінювати хімічний склад провідника (хімічна дія струму);
- 3) струм виявляє магнітну дію.

Постійним називається струм, величина і напрям якого на протязі часу не змінюються.

Кількісними характеристиками електричного струму є *сила струму* і його *густина*. Сила струму є скалярною величиною, а густина струму – векторна. Сила струму може бути як додатною так і від'ємною. Знак сили струму залежить від того, який з напрямів вздовж провідника прийняти за додатний. Сила струму $I > 0$, якщо напрям струму збігається з умовно вибраним додатним напрямом уздовж провідника. В іншому випадку $I < 0$.

Сила струму залежить від заряду, що його переносить кожна частинка, від концентрації частинок, швидкості їх напрямленого руху і площі поперечного перерізу провідника.

Для виникнення й існування електричного струму необхідні дві умови:

- 1) наявність у даному середовищі вільних заряджених мікроскопічних частинок, які могли б переміщуватись (електронів, іонів). А для створення й підтримання упорядкованого руху заряджених частинок потрібна сила, що діє на них у певному напрямі;

2) наявність у ньому електричного поля, за рахунок енергії якого переміщувалися б заряджені частинки. Звичайно саме електричне поле всередині провідника є причиною, що викликає і підтримує впорядкований рух заряджених частинок. Отже, повинна існувати різниця потенціалів (напруга) між двома точками провідника.

Гальванометр – це прилад, за допомогою якого можна виявити та встановити напрям електричного струму. *Гальванометр* - це дуже чутливий прилад, який дозволяє виявити і виміряти дуже малі заряди і напруги. Принцип дії гальванометра ґрунтується на явищі взаємодії котушки із струмом та магніту. Коли в котушці є струм, стрілка відхиляється. Гальванометр в коло під'єднується *послідовно*.

Гальванометри бувають *стрілочні*, *дзеркальні* і *струнні*. До дзеркальних гальванометрів відносяться також *балістичні*, що мають велику інертність і дозволяють реєструвати навіть короточасні імпульси струмів.

Щоб відрізнити гальванометр від інших електровимірювальних приладів, на шкалі ставлять букву *G*. На схемах гальванометр зображають кружечком з буквою *G* всередині.

Якщо гальванометр зашунтувати, то він собою буде являти амперметр, а якщо до цього ж гальванометра ввімкнути додатковий опір, то він буде працювати як вольтметр.

За напрям струму приймають напрям руху *позитивно заряджених частинок*. Якщо струм утворився рухом негативно заряджених частинок, то напрям струму вважають протилежному напрямку руху частинок.

Щоб використати енергію електричного струму, треба мати *джерело струму*. Електричне поле в провідниках створюється й може довго підтримуватися *джерелами електричного струму*. Пристрій, в якому енергія якого-небудь виду протягом усього часу перетворювалася б в енергію електричного поля називається *джерелом електричного струму* або пристрій, в якому виникають сторонні сили, називають *джерелом струму* (наприклад, гальванічний елемент, генератор електричного струму, термопара, сонячна батарея).

Сторонні сили – це будь-які сили неелектричного походження, які діють на заряджені частинки.

Джерела струму бувають різні, але в будь-якому з них виконується робота розділення позитивно і негативно заряджених частинок. Розділені частинки нагромаджуються на *полюсах* джерела струму – це так звані місця, до яких за допомогою клем або затискачів підмикають провідники. Один полюс джерела струму заряджається *позитивно*, другий – *негативно*.

Джерела електричного струму характеризуються *електрорушійною силою*.

Щоб дістати неперервний струм, треба створити *електричне коло*.

Ділянка кола, що не містить джерела струму, називається *однорідним*.

Різні прилади, які працюють від електричного струму (електродвигуни, лампи, електричні плитки тощо) називають *приймачами* або *споживачами електричної енергії*.

Електричну енергію від джерела електричної енергії передають до приймача через *проводи*.

Пристрої, які з'єднують і роз'єднують електричні кола називають *ключі, рубильники, кнопки, вимикачі*.

Джерело струму і з'єднаними із ним пристроями, називають *електричним колом*. Щоб у колі був струм, воно має бути *замкненим*.

Креслення, на яких зображено способи з'єднання електричних приладів у коло, називають *схемами*. Прилади на схемах позначають умовними знаками.

Сила струму вимірюється приладами, які називаються *амперметрами*. Амперметр – це той самий гальванометр, тільки пристосований для вимірювання сили струму.

Щоб відрізнити амперметр від інших електровимірювальних приладів, на шкалі ставлять букву А. На схемах амперметр зображають кружечком з буквою А всередині.

Щоб виміряти силу струму, амперметр вмикають у коло *послідовно* з тим приладом, силу струму в якому треба виміряти. У колі, яке складається з джерела струму й ряду провідників, з'єднаних так, що кінець одного провідника з'єднується з початком другого, сила струму в усіх ділянках *однакова*. Він побудований так, що *опір його дуже малий* і під час вмикання його в коло сила струму в колі не змінюється.

Теплова, магнітна та хімічна дії струму залежать від сили струму. Змінюючи силу струму можна регулювати ці дії. Але щоб керувати струмом у колі, треба знати від чого залежить сила струму в ньому. Дія поля характеризується фізичною величиною – напругою. Тому сила струму залежить від напруги. Тобто сила струму в провіднику *прямо пропорційна* напрузі на кінцях провідника. Цю залежність називають *вольт-амперною характеристикою*.

$$I = f(U).$$

Дана залежність являє собою пряму лінію, що проходить через початок координат.

Омметр – це прилад, що призначений для вимірювання опору провідника. Найбільш поширеними є омметри магнітоелектричної системи.

Для вимірювання великих опорів використовуються електронні омметри, що складаються із потенціометра. В колах змінного струму омметр вимірює активний опір провідника.

Надпровідність – явище різкого зменшення електричного опору

деяких металів (сплавів і сполук) при температурі, близькій до абсолютного нуля. Надпровідність характеризується не тільки майже зниженням електричного опору, а й одночасно зміною його магнітних і теплових параметрів (без зміни кристалічної решітки). Надпровідність – це особливий стан речовини, а її перехід у такий стан є фазовим переходом другого роду. Стан надпровідності настає при охолодженні речовини до певної, характерної для конкретної речовини, температури, яку називають *критичною* (T_K).

Для отримання необхідного опору з'єднання споживачів є *послідовне* або *паралельне*.

Послідовним називають таке з'єднання споживачів, при якому кінець кожного попереднього провідника з'єднують з початком тільки одного наступного провідника.

Паралельним називають таке з'єднання провідників, при якому початки всіх провідників з'єднуються в один вузол, а кінці – в другий.

Провідник, що є носієм опору у колі, називається *резистором*. Інакше *резистори* – це провідники з опором.

Резистори бувають із *постійним опором (постійні резистори)* і *регульовані (реостати, потенціометри)*. Причому сила струму в таких провідниках (з незмінним опором) прямо пропорційна напрузі.

На практиці часто доводиться змінювати силу струму (опір) роблячи її то меншою, то більшою. В таких випадках використовуються спеціальні прилади - *реостати*.

Реостат – прилад для регулювання сили струму в колі шляхом зміни опору кола. Реостати бувають: з *ковзаючим контактом* та *штенсельні реостати (магазин опорів)*.

Також на практиці часто доводиться змінювати напругу роблячи, при цьому, її то меншою, то більшою. Для цього використовують прилади – *потенціометри*. *Потенціометр* – прилад для регулювання (плавної зміни) напруги.

Ватметр – це прилад, призначений для вимірювання потужності електричного струму. Найбільш поширені ватметри електродинамічної системи, що дозволяють вимірювати потужність як постійного, так змінного струму.

Ватметр складається з двох котушок: *нерухомої* і *рухомої*. Кут повороту рухомої котушки пропорційний як силі струму I в нерухомій котушці, так і напрузі U на вимірній ділянці R , тобто пропорційний потужності струму P в ній.

На корпусі ватметра є чотири клеми, до яких підведені кінці рухомої і нерухомої котушок. Клеми, які необхідно вмикати послідовно до вимірювальної ділянки, позначають літерою A , а ті які необхідно вмикати паралельно, - літерою V .

Основною частиною сучасної лампи розжарювання – спіраль із тонкого вольфрамового дроту. Вольфрам тугоплавкий метал, його температура плавлення 3387°C . У лампі розжарювання вольфрамова спіраль нагрівається до 3000°C . Будова лампи розжарювання: спіраль; скляний балон; цоколь.

Промисловість випускає лампи розжарювання на напругу 220 і 127 В (для освітлювальної мережі), 50 В (для залізничних вагонів), 12 і 6 В (для автомобілів), 3,5 і 2,5 В (для кишенькових ліхтариків).

Винахідниками електричного освітлення були російський інженер О.М. Лодигін та американський винахідник Т. Едісон.

Теплову дію електричного струму використовують у різних електронагрівальних приладах та установках. Основна частина будь-якого нагрівального електричного приладу – *нагрівальний елемент*. *Нагрівальний елемент* – це провідник з великим питомим опором, здатний, крім того, витримувати не руйнуючись, нагрівання до високої температури ($1000 - 1200^{\circ}\text{C}$). У нагрівальному елементі провідник у вигляді дроту чи стрічки намотуються на пластинку з жаростійкого матеріалу: слюди, кераміки.

Хімічні джерела струму – це пристрої, в яких енергія хімічних реакцій безпосередньо перетворюється в електричну енергію. До них належать гальванічні елементи, акумулятори, електрохімічні генератори, які називаються також паливними елементами.

1. *Гальванічні елементи*. До них можна віднести гальванічний елемент *Даніеля*. У ньому цинковий електрод занурений у розчин цинкового купоросу ZnSO_4 , а мідний електрод – у розчин мідного купоросу CuSO_4 . Отже, у даному елементі цинк переходить з електрода в розчин, а мідь виділяється на електроді.

Крім елемента Даніеля, досить простим за своєю будовою є елемент *Вольта*. Він складається з мідного і цинкового електродів, опущених у слабкий розчин сірчаної кислоти.

2. *Нормальний елемент Вестона* служить для забезпечення еталонів напруг у лабораторній практиці використовується ртутно-кадмієвий нормальний елемент Вестона. Цей елемент відрізняється від інших елементів високою стабільністю ЕРС.

3. *Акумулятори*. Джерела струму після розрядження яких вони можуть бути приведені в попередній стан (заряджений) пропусканням крізь них електричного струму від зовнішнього джерела. Найбільшого поширення набув свинцевий, або кислотний, акумулятор.

4. *Паливні елементи*. До паливних елементів належать хімічні джерела струму, в яких електрична енергія утворюється внаслідок хімічної реакції між відновником і окисником, що неперервно подаються до електродів із зовні, а продукти реакції виводяться з паливного елемента.

Коротким замиканням називають з'єднання кінців ділянки кола провідником, опір якого дуже малий порівняно з опором ділянки кола.

$$I_{\max} = \frac{U}{R}, \text{ при } R \rightarrow 0.$$

Інакше: якщо полюси джерела струму заморочені провідником з дуже малим опором, тобто якщо коло не містить зовнішнього опору (навантаження R), то таке з'єднання кінців кола називається *коротким замиканням*. При короткому замиканні закон Ома для повного кола має вигляд:

$$I_{\max} = \frac{\xi}{r}, \text{ так як } R = 0,$$

де I_{\max} - сила короткого замикання.

Щоб уникнути короткого замикання в мережу вмикають *запобіжники*.

Запобіжники – пристрої, що служать для вимикання кола, якщо сила струму перевищує допустиме значення. Запобіжники поділяються на: *плавкі*; *запобіжники-автомати*.

Плавкими називаються запобіжники з провідником, що плавиться.

Запобіжники автомати – це запобіжники, які в процесі зростання струму в колі, автоматично його розмикають.

Містком Уїтстона називають схему, за допомогою якої можна виміряти невідомий опір R_x при відомому еталонному опорі R_{et} . Опори, що ввімкнені в схему називають *плечами*. Робота містка Уїтстона побудована на правилах Кірхгофа.

Реохорд – це реостат з нанесеними на нього поділками. Або *реохорд* – спеціальний провід на лінійці, по якому може рухатися повзунок. Переміщуючи повзунок по реохорду, необхідно слідкувати за стрілкою гальванометра, і коли вона зупиниться на нулі, це означає, що по містку струм не проходить і для визначення R_x можна скористатися формулою:

$$R_x = R_e \frac{l_1}{l_2},$$

де R_e - еталонний опір; l_1 і l_2 - плечі реохорда, що вимірюються з допомогою лінійки.

Шунт приєднують завжди паралельно вимірювальному приладу.

Прилад шунтують тоді, коли треба зменшити його загальний опір, коли струм дуже великий і частину його треба провести поза приладом, щоб не зіпсувати приладу.

$$R_s = \frac{R_{np}}{n-1},$$

де $n = \frac{I}{I_{np}}$; I - величина вимірювального струму (номінальне значення

сили струму, який треба виміряти); I_{np} - максимальний струм, на який розрахований прилад.

Опір шунта повинен бути в $n - 1$ раз менше опору амперметра.

Додатковий опір. Іноді виникає потреба виміряти напругу між точками, в n разів більшу від тієї, на яку розрахований вольтметр. Тоді треба розширити межі вимірювання вольтметра. Для цього до вольтметра приєднують послідовно додатковий опір.

$$R_d = R_{np}(n-1),$$

де $n = \frac{U}{U_{np}}$; U - величина вимірювальної напруги (номінальне

значення напруги, яке необхідно виміряти); U_{np} - максимальна напруга, на яку розрахований прилад.

Додатковий опір, підключений до нього послідовно, повинен бути в $n - 1$ разів більший опору самого вольтметра.

Заземлення (англ. grounding) – це навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих неструмопровідних частин, які можуть бути під напругою. *Призначення захисного заземлення* – уникнути ураження людей електричним струмом при виникненні напруги на конструкторських частинах електрообладнання, тобто при замиканні на корпус.

Розрізняють заземлювачі *штучні* – призначенні для заземлення, і *природні* – що знаходяться в землі металеві предмети для інших цілей.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩ

Щодо провідності речовини можна поділити на: *провідники, напівпровідники, діелектрики.*

Провідники – речовини з великою кількістю вільних заряджених частинок (метали, водні розчини та розплави електролітів й іонізований газ – плазма).

Напівпровідники – речовини, які за своєю електропровідністю займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Напівпровідники мають такі властивості: 1) їх електропровідність сильно залежить від зовнішніх впливів (температури, опромінювання, домішок та ін.); 2) з підвищенням температури їх електропровідність різко зростає; 3) електропровідність не пов'язана з перенесенням речовини і має електронний механізм. До них відносяться кремній, германій, селен тощо.

Діелектрики – речовини з невеликою кількістю вільних заряджених частинок, а тому вони не проводять електричний струм. Такі речовини можуть перебувати в різних агрегатних станах. При інтенсивних впливах (ударна іонізація, фотоіонізація, термодисоціація тощо) діелектрики

можуть стати провідниками і напівпровідниками.

Струм в металах

Струм у металах створюють вільні, не зв'язані з певними атомами електрони – електрони провідності. За сучасними поглядами такими електронами є валентні електрони атомів металу, які найслабше зв'язані з ядрами атомів.

Валентні електрони – електрони атома елемента, що беруть участь в утворенні хімічних зв'язків в речовинах, що мають молекулярну будову. У металах валентні електрони легко переходять від одного атома до іншого. Як правило, це неспарені електрони зовнішнього енергетичного рівня атомів.

Зовнішні електрони – електрони зовнішнього енергетичного рівня атома елемента в його основному стані. Зовнішні електрони обумовлюють, як правило, хімічні властивості елемента.

Електропровідність металів зумовлена перенесенням заряджених частинок, спільних для всіх металів, і не пов'язана з відмінністю їх фізичних і хімічних властивостей.

В кристалах металів і сплавів проявляється *металічний зв'язок*. *Металічний зв'язок* – хімічний зв'язок, що утворюється внаслідок взаємного притягання між атомами металічних елементів, що втратили електрони, і електронним газом.

Електронною теорією провідності металів називається вчення про те, що носіями зарядів, які створюють струм в металах, є вільні електрони. Отже, згідно теорії носіями вільного заряду у металах є *електрони*. Ці електрони беруть участь у хаотичному тепловому русі. Під дією електричного поля вони починають переміщуватися впорядковано із середньою швидкістю порядку $10^{-4} \frac{m}{c}$.

Дослід Рікке полягав у тому, що він з'єднав послідовно три металевих циліндри: мідний, алюмінієвий і мідний, розташував їх зачищені основи тісно один з одним, а потім підключив їх до джерела постійного струму і на протязі року пропускав по цим циліндрам струм. При цьому через основи циліндрів пройшов великий заряд, порядку мільйонну кулонів. Коли Рікке роз'єднав циліндри, то їх основи залишилися такими ж зачищеними, які й були, і маси кожного циліндра також залишилися попередніми. Отже, дослідом Рікке встановлено, що *при проходженні струму через провідник переносу речовини не відбувається*.

В 1913 році Мандельштам і Папалексі провели дослід, який показав, що струм в металах переноситься *вільними зарядами*. Вони надавали котушці з провідником швидких крутильних коливань відносно осі, а кінці провідника приєднували до нерухомої телефонної трубки. У колі з'являвся

електричний струм, який спричиняв тріск у телефонній трубці. Цими дослідженнями було підтверджено наявність у металах вільних електрично заряджених частинок, проте ці дослідження не виявляли напрямку струму і знаку заряду частинок.

В 1916 р. англійські фізики Ч. Стюарт і Р. Толмен, замінивши телефон чутливим балістичним гальванометром, а крутильні коливання – швидким обертанням котушки з великою кількістю витків тонкого дроту навколо власної осі, експериментально довели *існування вільних електронів у металах*. Напрямок відхилення стрілки гальванометра вказував на те, що струм у металах зумовлений рухом *негативно* заряджених частинок. Було визначено також їх питомий заряд (відношення заряду до маси частинки):

$$\frac{e}{m} = \frac{Lv_0}{qR},$$

де L - довжина провідника; R - опір провідника.

Швидкість упорядкованого руху електронів у металевому провіднику

$$|v| = \frac{|I|}{enS},$$

де I - сила струму; e - заряд електрона; n - концентрація вільних електронів; S - площа поперечного перерізу провідника.

Класична електронна теорія провідності металів

Створена в 1900 р. німецьким фізиком П. Друде. Ідеї Друде далі розвинув Х. Лоренц, підвівши під них досконалішу теоретичну основу. Вона була названа *класичною* тому, що в її основу лягли закони класичної фізики: закони Ньютона, Ома, представлення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.

В основу класичної теорії провідності металів покладено такі положення.

1. Метал як кристалічне тіло є системою позитивних іонів і вільних електронів.

2. Електронний газ вважається ідеальним газом, взаємодією між електронами можна знехтувати, враховується тільки взаємодія з іонами ґратки.

3. Електронний газ підлягає законам одноатомного ідеального газу.

4. Внаслідок хаотичного руху електронів у разі відсутності електричного поля в металі немає домінуючого напрямку переміщення зарядів.

5. Електрон набуває енергії впорядкованого руху під дією зовнішнього електричного поля тільки на шляху вільного пробігу.

Класична теорія електропровідності дає наступну залежність питомого опору металу від швидкості теплового руху електронів v , їх концентрації і

середній довжині вільного пробігу електронів між двома послідовними співударами з іонами кристалічної ґратки $\bar{\lambda}$:

$$\rho = \frac{2m_e \bar{v}}{e^2 \bar{\lambda}}.$$

Розходження між класичною теорією і дослідними фактами

1. Передусім це стосується закону Відемана-Франца, який справджується в обмеженому інтервалі температур і відхилення від якого особливо різучі при низьких температурах.

2. Класична електронна теорія виявилася неспроможною пояснити температурну залежність опору провідника.

3. Суперечність теорії з дослідними даними, що стосується теплоємності твердих тіл.

4. Класична електронна теорія наштовхнулася на великі труднощі при оцінюванні довжини вільного пробігу електронів у металах.

Квантова теорія провідності металів

У теорії Друде-Лоренца електрон розглядається як матеріальна точка, яка підлягає законам класичної механіки. Але електрон має свої специфічні властивості. Електрону властива маса, заряд, внутрішній момент кількості руху, який називається *спіном*, і спіновий магнітний момент. Електрон має і корпускулярні, і хвильові властивості. Тому не можна переносити законів класичної механіки на електрони та інші мікрочастинки. Властивості електронів описуються квантовою механікою.

Отже, згідно цієї теорії електрони в атомах речовин можуть мати не будь-якими, а лише певними значеннями енергії, що відповідають номерам їх електронних орбіт.

Величина енергії, яку може мати електрон в атомі або кристалі, називається *енергетичним рівнем*.

Якщо атому надати ззовні енергію, то він перейде в *збуджений стан* і при цьому його електрони перейдуть на більш віддалені від ядра орбіти, іншими словами, *піднімуться на більш високі енергетичні рівні*. Але зробити це вони зможуть тільки в тому випадку, якщо ці рівні заповнені не повністю. Так як більшість енергетичних рівнів атома заповнені повністю, незаповненими є лише самі верхні енергетичні рівні. Що відповідають зовнішнім електронним оболонкам, на яких розташовуються *валентні електрони*, при цьому ці електрони і можуть здійснювати переходи між енергетичними рівнями атома.

При об'єднанні атомів в кристал металу валентні електрони стають вільними і утворюють *«електронний газ»*.

Рівень Фермі – це найвищий енергетичний рівень при $T = 0\text{ K}$ зайнятий електронами.

Струм у напівпровідниках

Речовини питомий опір, у яких з підвищенням температури не зростає, як у металів, а зменшується називаються *напівпровідниками*. Механізм виникнення провідності в напівпровідниках залежить від будови напівпровідникових кристалів і природи зв'язків, що утримують атоми один біля одного.

Ковалентний зв'язок – зв'язок, що здійснюється за допомогою утворення спільних електронних пар між атомами елементів.

Ковалентний неполярний зв'язок – зв'язок, при якому спільна електронна пара знаходиться симетрично відносно ядер атомів двох елементів. Ковалентний неполярний зв'язок виникає між атомами елементів з однаковими електронегативностями.

Ковалентний полярний зв'язок – зв'язок, у якому спільні електронні пари зміщені у бік більш електронегативного атома. Він виникає між атомами елементів, у яких різниця електронегативностей знаходиться в межах від 0 до 2,5.

Електронегативність – число, що показує відносну силу, з якою притягуються валентні електрони атомами елемента у сполуці.

Власна провідність напівпровідників

Струм в хімічно чистому напівпровіднику – це впорядкований рух електронів і дірок в провіднику вздовж силових ліній електричного поля, в яке він поміщений. Тобто розрізняють електропровідність напівпровідників *власну* і *домішкову*.

Провідність хімічно чистих напівпровідників, що обумовлена рухом електронів і дірок, називається *електронно-дірковою*, або *власною провідністю*, а самі напівпровідники – *власними напівпровідниками*.

Провідність власних напівпровідників, зумовлену електронами, називають *електронною провідністю* або *провідністю n - типу*. Провідність власних напівпровідників, зумовлена квазічастинками – дірками, називають *дірковою провідністю* або *провідністю p - типу*.

Отже, у власних напівпровідниках спостерігається два механізми провідності – *електронний* і *дірковий*.

Електрична провідність напівпровідників, які мають домішки

Під *домішками* розуміють введені у кристалічну решітку атоми інших елементів. Домішки відіграють подвійну роль. Провідність провідників, що зумовлена наявністю в них надлишкових електронів домішок, називаються *донорною провідністю*, а саму речовину, що принесла в напівпровідник додаткові електрони, – *донором*. (Від латинського *donare* – той що дає). Домішки відіграють подвійну роль.

Домішки є донорами в тому випадку, коли її валентність більша валентності основного провідника.

Напівпровідник з донорною провідністю називається *напівпровідником n-типу*. (Від латинського *negativus* – негативний).

Провідність напівпровідників, що зумовлена наявністю в них дірок, називається *акцепторною*, а речовина, що принесла їх в основний напівпровідник, – *акцептором*. (Від латинського *acceptor* – приймач).

Акцептором може бути речовина, валентність якої менша валентності основного провідника.

Акцепторна провідність називається також *провідністю p-типу*. (Від латинського *positiv* – позитивний).

Тобто в одних випадках домішки є додатковими постачальниками електронів у кристалі, атоми таких домішок називають *донорами*. Домішки, атоми яких є центрами захоплення електронів у кристалах називаються *акцепторами* – споживачами.

Якщо валентність домішок більша валентності основного напівпровідника, то його провідність донорна, а якщо менша, - то акцепторна.

Як відомо напівпровідники мають *власну і домішкову* провідність і її можна пояснити на основі зонної теорії.

Енергія, потрібна електрону для міжзонального переходу, називається *енергією активації власної провідності*. Для германію вона дорівнює 0,72 eV, для кремнію – 1,1 eV, для селену – 1,7 eV.

За зонною теорією домішкові акцепторні атоми вносять додаткові незайняті енергетичні рівні, які лежать в області забороненої зони ближче до верхнього рівня валентної зони напівпровідника. Додаткові рівні називаються *рівнями прилипання*, або *акцепторними*. Оскільки $\Delta W'' < \Delta W$, то під впливом теплового руху електрони переходять з рівнів біля верхнього краю заповненої зони напівпровідника на акцепторні рівні домішок. При цьому у валентній зоні напівпровідника виникають енергетичні рівні, або дірки. Ці дірки заповнюються електронами з нижчих енергетичних рівнів. Такий тип провідності напівпровідника називається *дірковою домішковою провідністю* або провідністю *p-типу*.

Залежність питомого опору ρ та електропровідності напівпровідника σ від абсолютної температури T :

$$\frac{1}{\rho} = \sigma_0 \cdot 2,7^{\frac{\Delta W}{2kT}}; \quad \sigma = \sigma_0 \cdot 2,7^{\frac{\Delta W}{2kT}},$$

де σ_0 - стала для даного напівпровідника величина, що залежить від властивостей саме цього провідника; ΔW - енергія активації, тобто енергія, необхідна електрону для розриву ковалентного зв'язку; k - стала Больцмана.

Із ростом температури T питомий опір ρ падає по кривій, яка називається *експонентою*.

$$\rho = f(T).$$

При незмінній температурі число електронів і дірок, що рекомбінують за одиницю часу дорівнює числу вивільнених, тобто між ними підтримується динамічна рівновага.

Рекомбінація – процес одночасного зникнення електрона і дірки. (При зустрічі з діркою – електрон може бути захвалений нею).

Контакт двох напівпровідників називають *p – n – переходом*.

Дірки в *p*-напівпровіднику називаються *основними носіями зарядів*, продифундовані в нього електрони – *неосновними*. Електрони в *n*-напівпровіднику називаються *основними носіями зарядів* в ньому, а дірки, яким вдалося проникнути поглибше в *n*-напівпровідник, подолавши відштовхування дірок *p – n – переходу*, *неосновними носіями зарядів*.

Таким чином, *електрони в n-напівпровіднику – основні носії зарядів, а дірки в ньому – неосновні*. В свою чергу, *дірки в p-напівпровіднику – основні носії зарядів, а електрони в ньому – неосновні*.

p – n – перехід може бути *прямим і зворотним*. *Прямим* називають перехід, при якому струм передається основними носіями: з ділянки *n* у ділянку *p* електронами, а з ділянки *p* у ділянку *n* дірками. Внаслідок такого переносу провідність буде великою, а опір малим. Струм, який буде проходити через такий *p – n*-перехід буде дуже великий і він називається *прямим струмом*.

Зворотним називають перехід, при якому струм передається неосновними носіями: з ділянки *p* у ділянку *n* електронами, а з ділянки *n* у ділянку *p* дірками. Внаслідок цього провідність буде малою, а опір великим - виникає *запірний шар*, тобто шар, збіднений вільними носіями заряду. Струм, який буде проходити через такий *p – n*-перехід буде дуже малий і в багато разів менший сили прямого струму, то такий струм називається *зворотнім струмом*.

Прямий струм створюють основні носії зарядів напівпровідника, а зворотній – неосновні.

p – n – перехід відносно струму несиметричний: у прямому напрямі опір переходу значно менший, ніж у зворотному. Ця властивість використовується для *випрямлення змінного струму*.

Властивості *p – n – переходу*

1. *Опір p – n – переходу в декілька разів більший опору інших частин напівпровідника*.

2. *p – n -перехід має властивість пропускати струм в одному напрямку і майже не пропускати в зворотному*. Ця властивість *p – n – переходу* використовується в напівпровідникових діодах для випрямлення

змінного струму.

Напівпровідники широко використовуються в різних галузях науки і техніки. Так як виникнення носіїв заряду в них може бути обумовлено не тільки тепловим ефектом, але і механічною дією, світловим випромінюванням, струмами високої частоти, іонізуючим випромінюванням і т.д. До них відносяться напівпровідниковий діод, напівпровідниковий тріод (транзистор), термістори, напівпровідникові фотоелементи, фоторезистори, термоопори (термістори), сонячні батареї.

Напівпровідникові діоди мають контакт двох напівпровідників з $p-n$ -переходом, що зумовлює однобічну провідність і застосовується в електро- та радіоустановках для випрямлення змінного струму. За конструкцією вони поділяються на *точкові* і *площинні*. Випрямляючі властивості напівпровідникових діодів характеризуються *коефіцієнтом випрямлення* k .

Коефіцієнт випрямлення напівпровідникового діода дорівнює відношенню сили прямого струму, що протікає через діод, до сили зворотного струму

$$k = \frac{I_{\text{прям.}}}{I_{\text{зворот.}}}.$$

Напівпровідникові тріоди (транзистори) застосовуються для генерації і підсилення радіосигналів. Вони складаються з трьох електродів: *бази (Б)*, *емітера (Е)*, *колектора (К)*. Розрізняють тріоди на основі p -напівпровідника (типу $n-p-n$), або на основі n -напівпровідника (типу $p-n-p$).

Транзистор підсилює напругу на переході база-колектор, причому це підсилення відбувається за рахунок енергії джерела струму в колі колектора.

Термоопори (термістори) – це напівпровідники електричний опір, яких значною мірою залежить від температури. Їх застосовують для вимірювання температур, автоматичного регулювання струму, вимірювання швидкості рухомих об'єктів, у газоаналізаторах тощо.

Фоторезистори (фотоопори) - напівпровідники власна провідність, яких залежить від освітлення. Дія фоторезисторів ґрунтується на *явищі фотоелектричного ефекту*. *Фотоелектричним ефектом* називають явище, при якому електрична провідність зростає внаслідок розривання зв'язків і утворення вільних електронів і дірок за рахунок енергії світла, що падає на напівпровідник. Фоторезистори застосовують для автоматичних пристроїв, світлових вимірювань тощо.

Напівпровідникові фотоелементи - прилади, в яких світло, діючи на $p-n$ -перехід запірного шару, зумовлює виникнення електрорушійної сили порядку кількох десятків вольт. Напівпровідникові фотоелементи не

потребують джерела напруги, вони самі безпосередньо перетворюють світлову енергію в електричну.

Сонячна батарея – напівпровідник, ввімкнений в електричне коло, який зумовлює проходження електричного струму внаслідок попадання світла на $p-n$ -перехід (в результаті цього опір різко зменшується). Сонячні батареї мініатюрі, дешеві і довговічні, при цьому їх встановлюють на супутниках і космічних кораблях. З допомогою сонячних батарей можна обігрівати приміщення, на таких батареях працюють електромобілі – автомобілі, що не потребують бензину.

Сучасні *германієві підсилювачі*, які дозволяють підсилювати напругу і потужність струму в десятки тисячі разів.

Напівпровідникові транзистори застосовують в *електронному реле*, що дозволяє вмикати і вимикати струм в лампі зі швидкістю до тисячі раз в секунду, який звичайними механічними перемикачами досягти неможливо.

На властивості напівпровідників змінювати число носіїв зарядів під механічним впливом оснований принцип дії *тензодатчиків* – дуже чутливих приладів, що мають можливість вимірювати величину тиску в широких межах.

На основі електронних пучків генерувати в напівпровідниках додаткову кількість зарядів базується дія *напівпровідникових лазерів*.

У всіх сучасних ЕОМ використовують напівпровідникові прилади.

Мікроелектроніка – область електроніки, в якій розглядаються проблеми створення різних електронних пристроїв в єдиному технологічному процесі (тобто всіх сразу) і в мініатюрному виконанні.

Мікроелектроніка дає можливість створювати та використовувати *інтегральні мікросхеми*, тобто дрібні пластинки із напівпровідників, на які у вакуумі напильюється вся схема, і на які одночасно можна нанести тисячі приладів (діодів, транзисторів, конденсаторів і резисторів).

Струм у вакуумі

Вакуум – розріджений до такої міри газ, що середня довжина вільного пробігу молекул перебільшує лінійні розміри посудини.

Вакуум відмінний ізолятор тому, що в ньому немає вільних носіїв заряду. У вакуумі струм не виникає навіть при створенні різниці потенціалів. Для наявності електричного струму в колі необхідно дві умови: існування різниці потенціалів і наявність вільних заряджених частинок.

Отже, *струм у вакуумі* – це впорядкований рух електронів або інших зарядів, внесених в вакуум їх джерелом, під дією зовнішнього електричного поля.

Емісію, зумовлену тепловим рухом електронів, називають *термоелектронною*. Електрони, що випускаються розжареним металом

називають *термоелектронами*, а сам метал – *емітером*.

Фотоелектронна емісія – виривання електронів з поверхні тіла під дією світла.

Вторинна емісія – вибивання електронів з металу у вакуумі при його бомбардуванні зарядженими частинками.

Електронний пучок – це частина електронів, прискорених електричним полем, що пролітають крізь отвір аноду електронної лампи. Кількістю електронів у пучку можна керувати, змінюючи потенціал додаткового електрода, встановленого між катодом і анодом. Електронний пучок, потрапляючи на тіла, спричиняє їх нагрівання.

Можливість керування електронним пучком за допомогою електричного або магнітного полів і світіння під дією пучка електронів екрана, покритого люмінофором, застосовують в електронно-променевій трубці.

Люмінофори – речовини, які дають люмінесцентне світіння. Поділяються на: *фотолюмінофори* – речовини, що світяться під дією освітлення; *катодолюмінофори* – речовини, що світяться під ударом заряджених частинок; *люмінофори радіоактивного збудження* тощо.

Електровакуумний прилад – це прилад, в якому проходження електричного струму здійснюється тільки вільними електронами. Або *вакуумні прилади* – пристрої, основані на явищі термоелектронної емісії.

Діодом називають електронну лампу, яка має два електроди – катод і анод. Катодом є нитка розжарення з вольфраму, анодом – металевий циліндр. Такий діод називають *діодом прямого розжарення* (тобто в ньому електрони випускає сам розжарений метал).

Діоди з підігрівним катодом служать для збільшення густини струму, при посередньому розжаренні катода. Їх ще називають *діодизоксидними катодами* або *діоди з катодами непрямого розжарення*.

Діод є для електронів ніби вулицею з одностороннім рухом, тобто він працює як електричний вентиль. Саме цю властивість широко використовували в електронній техніці для випрямлення змінного струму.

Вольт-амперна характеристика діодів відображає залежність анодного струму I_A , що тече від анода до катода, від анодної напруги U_A – напруги на електродах.

$$I_A = f(U_A).$$

Крива буде мати початок в початку координат. При збільшенні анодної напруги, сила струму буде зростати і крива графіка буде ставати крутішою. При досягненні напруги насичення сила анодного струму перестане теж зростати. Такий струм називається *струмом насичення*, а сам стан лампи – *станом насичення*.

Аналіз вольт амперної характеристики діода показує, що як при

прямому, так і непрямому розжаренні катода, сила анодного струму зростає нелінійно з ростом анодної напруги. Відповідно, до струму в діоді закон Ома незастосовний для ділянки кола (його можна застосовувати лише на невеликих ділянках вольт-амперної характеристики при непрямому розжаренні).

Триелектродна лампа (тріод) - це прилад у якому між катодом і анодом розміщують третій електрод (сітку). Принцип дії триелектродної лампи полягає в керуванні силою анодного струму за допомогою сіткової напруги. Сітку тріода називають *керуючою*. Тріод – підсилювач слабких струмів та напруг, які наявні в колі сітки.

Електронно-променева трубка – це пристрій у якому електрони рухаються від катода до анода у вигляді електронного променя, вдаряються в екран, покритий спеціальною речовиною - люмінофором, який починає світитися в тому місці, куди попадають електрони. Або *електронно-променева трубка* – це вакуумний прилад, який призначений для перетворення електричних сигналів у видимі світлові.

Основними частинами електронно-променевої трубки є вакуумний балон, електронна пушка, керуючі електрони і екран, покритий шаром кристалів, які світяться під ударами електронів.

Електронно-променева трубка – основний елемент телевізора, осцилографа й монітора в комп'ютері.

Осцилограф – прилад для дослідження швидкозмінних процесів в електричних колах. Від латинського слова «осцилло» - хитаюсь і грецького слова «графо» - пишу.

Потік частинок речовини або променів, подібні до світлових, випромінюваний розжареним катодом, отримали назву *катодних променів*. Частинки, що входили до складу катодних променів, були названі *електронами*.

Струм в рідинах

Чисті рідини не пропускають електричний струм (дистильована вода, гліцерин, гас тощо). Це пояснюється тим, що в таких рідинах мало носіїв струму – іонів.

Якщо в рідині, наприклад у воді, розчинити сіль, кислоту або луг, то вона стає електропровідною. Це пояснюється тим, що під впливом розчинника молекули розчиненої речовини розпадаються (*дисоціюють*) на різнойменні іони.

З *підвищенням температури* електропровідність електролітів зростає, внаслідок збільшення швидкості теплового руху молекул та більш інтенсивної їх руйнації на іони. При цьому зростає концентрація іонів, їх рухливість, що веде до зменшення опору електроліту.

Іони – атоми або групи атомів, що набули заряду внаслідок приєднання

або втрати одного або кількох електронів.

Якщо атом, що втратив один або кілька електронів, уже не є нейтральним, а має позитивний заряд, то його називають *позитивним іоном*. Якщо зайвий електрон приєднується до нейтрального атома, тоді атом набуває негативного заряду і стає *негативним іоном*.

Іонний зв'язок – зв'язок, що обумовлений притяганням двох різнойменно заряджених іонів.

Електроліти – це провідники, в яких проходження струму спричиняє електроліз або речовини, що розпадаються в рідкому стані на іони.

Отже, *струм в електроліті* – це впорядкований рух іонів протилежного знаку під дією електричного поля в електроліті.

Електролітична дисоціація - це процес розпаду молекул розчиненої речовини на іони під впливом молекул розчинника та теплового руху молекул. Можливість різних речовин до дисоціації характеризується *ступінню дисоціації*, тобто числом молекул, що розпалися за одиницю часу або кількість іонів, що утворилися.

Рекомбінація (молізація) – процес возз'єднання різнойменних іонів у нейтральні молекули.

Електроліз – це окисно-відновлювальні реакції з виділенням на електродах речовини. На катоді при цьому виділяється чистий метал.

Вольт-амперна характеристика електролізу – це графічна залежність сили струму в електроліті від напруги на електроді.

$$I = f(U).$$

До наступу напруги насичення в електроліті сила струму буде прямо пропорційна прикладені напрузі. При деякій напрузі насичення, сили притягання іонів електроліту до електродів стануть дуже великими, що всі іони електроліту будуть втягнутими в порядковий рух до електродів. Струм, який буде відповідати даному стану, називається *струмом насичення*. Оскільки в подальшому напруга буде зростати, а струм насичення не змінюється, то такий стан називається *станом насичення*.

Знаючи сталу Авогадро і сталу Фарадея, можна знайти модуль заряду електрона:

$$e = \frac{F}{N_A}.$$

Електричний заряд будь-якого іона:

$$q = \pm \frac{ZF}{N_A}.$$

Заряд одновалентного іона дорівнює за абсолютною величиною значенню заряду електрона: $q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Застосування електролізу

I. *Електрометалургія* – відбувається електроліз руд при високих

температурах, порядку 900 градусів Цельсія для отримання чистих металів.

II. *Очищення (рафінування) металів.* Для цього очищений метал відливають у вигляді пластин та роблять їх анодами у електролітичній ванні. Електролітом служить розчин солі даного металу. Добираючи напругу між анодом та катодом, добиваються, щоб тільки очищений метал переходив з анода у розчин і виділявся на катоді. Домішки випадають на дно у вигляді осаду.

III. *Гальванотехніка.*

1) *Гальванопластика*, або електричне осадження металу на поверхні предмета для відтворення його форми.

2) *Гальваностегія* – електричне осадження металів для покриття одних металів шаром інших з метою оздоблення або захисту їх від корозії.

3) *Електролітичне травлення і полірування.* За допомогою електролізу можна полірувати поверхні металевих виробів.

4) *Електролітичні конденсатори.* Явище електролізу використовується для виготовлення електролітичних конденсаторів.

5) *Добування важкої води.* За допомогою електролітичного розкладання звичайної води протягом значних проміжків часу можна отримати воду з великим вмістом молекул D_2O .

Струм у газах

Гази на відміну від металів і електролітів за звичайних умов складаються з електрично нейтральних атомів та молекул і тому не є провідниками електрики. Гази стають електропровідниками внаслідок *іонізації* їх під дією зовнішніх збудників. При цьому їх молекули перетворюються в позитивні іони. Щоб іонізувати атом (молекулу), треба виконати роботу (роботу іонізації) проти сил взаємодії електрона з іншими частинками атома (молекулами). *Іонізація газу* – це розщеплення його нейтральних молекул і атомів на іони протилежних знаків і електрони. Зовнішні збудники, або джерела енергії, які спричиняють іонізацію газу, називаються *іонізаторами*.

Іонізація газу, що виникає в результаті зіткнення атомів і молекул газу при високій температурі, називається *термічною іонізацією*.

Іонізація газу, що виникає внаслідок дії на нього електромагнітними хвилями високої частоти (ультрафіолетовим світлом, рентгенівськими променями або гама-квантами), називається *фотоіонізацією*.

Іонізація газу можлива також під дією прискорених електронів та іонів (*ударна іонізація*).

Отже, *носіями струму в газі є позитивні і негативні іони і електрони*. Інакше: *струм в газі або газовий розряд – це впорядкований рух позитивних і негативних іонів і електронів під дією зовнішнього електричного поля*.

Вольт-амперна характеристика газового розряду – це залежність

сили струму I в газі від напруги U на електродах, тобто

$$I = f(U).$$

Коли напруга на електродах мала, не всі іони і електрони газу досягають електродів, і сила струму при цьому теж невелика. З ростом напруги на електродах сила струму також буде зростати, причому вона буде зростати прямо пропорційно прикладеній напрузі.

При досягненні деякої достатньо великої напруги, що називається *напругою насичення* $U_{\text{іан}}$, всі іони і електрони, які утворилися в газі за одиницю часу, будуть досягати електродів. При перевищенні напруги насичення сила струму в газі зростати не буде. Такий струм називається *струмом насичення*, а стан газу – *станом насичення*.

Якщо в подальшому збільшувати, ще напругу, то сила струму стане знову зростати, то виникає так званий *лавинний розряд*.

Якщо при напругах від 0 до $U_{\text{іан}}$ виключити іонізатор, то заряд в газі припиняється, тому що частина зарядів перейде на електроди, а частина рекомбінує, і взятися новим зарядам буде не звідки. Такий розряд називається *несамостійним*.

Ділянка вольт-амперної характеристики, яка відповідає несамостійному розряду, використовується в пропорційних лічильниках елементарних частинок. Так як на цій ділянці число нових електронів, отриманих в результаті іонізації ударом, пропорційне числу первинних електронів. Несамостійний газовий розряд на пучках швидких електронів використовується в *газових лазерах*.

Якщо продовжувати збільшувати напругу, то при деякій певній високій напрузі, що називається *напругою пробою* $U_{\text{іоді}}$ або *напругою запалення*, вже не тільки легкі електрони, але і масивні додатні іони набудуть дуже великої кінетичної енергії. При цьому вони почнуть бомбардувати катод, який їх притягує до себе і вибивати з нього нові електрони. Це явище називається *вторинною електронною емісією*. Крім того, під ударами важких іонів катод розігріється і з нього почнеться *термоелектронна емісія*. Поблизу катода виникає електричне поле дуже великої напруженості. Під дією якого електрони катода самі без додаткової взаємодії стануть покидати катод. Це явище називається *автоелектронною емісією*.

Якщо в будь-який момент, що відповідає даній ділянці графіку. Прикоротити дію зовнішнього іонізатора, то розряд в газі не зупиниться, так як нові носії зарядів в газі вже будуть народжуватися за рахунок автоелектронної, термоелектронної і вторинної електронної емісій, тобто за рахунок внутрішніх процесів в газі. Такий розряд називається *самостійним*.

Проходження електричного струму через газ називається *газовим*

розрядом. Залежно від механізму іонізації газу розрізняють *самостійні* і *несамостійні* газові розряди.

Самостійний газовий розряд підтримує сам себе і зберігається після припинення дії зовнішнього іонізатора, тобто під час розряду весь час утворюються вільні заряджені частинки. Вони можуть виникати внаслідок ударної іонізації.

Кінетична енергія електрона перед черговим зіткненням пропорційна напруженості поля і довжині вільного пробігу електрона (шляхи між двома послідовними зіткненнями):

$$\frac{m v^2}{2} = e E l.$$

Робота іонізації нейтрального атома:

$$\frac{m v^2}{2} \geq A_i.$$

Процеси при самостійному розряді, що підтримують його, це вторинна електронна емісія, термоелектронна емісія, іонізація ударом, автоелектронна емісія і фотоіонізація.

Несамостійний газовий розряд не підтримує сам себе і відбувається під впливом зовнішнього іонізатора. Якщо іонізатор перестає діяти, то розряд припиняється.

Залежно від властивостей і стану газу, характеру і розміщення електродів, а також від прикладеної до електродів напруги виникають різні види самостійного розряду в газах: *тліючий розряд*, *дуговий розряд*, *коронний розряд*, *іскровий розряд*, *китичний розряд*.

Тліючий розряд виникає при тисках у десяті й соті частки міліметра ртутного стовпчика і при напрузі між електродами в кілька сотень (а іноді й значно менше) вольтів.

Дуговий розряд є формою самостійного розряду, який виникає при великій густині струму і порівняно невеликій напрузі між електродами. Це потужне джерело світла.

Коронний розряд спостерігається при атмосферному тиску поблизу загострених ділянок провідника, що несе великий електричний заряд, спричиняється високою напруженістю електричного поля (близько

$3 \cdot 10^6 \frac{B}{m}$) і світна область якого нагадує корону.

Іскровий розряд виникає при великій напрузі між електродами в повітрі, який має вигляд пучка яскравих зигзагоподібних смужок, що розгалужуються від тонкого каналу.

Китичний розряд виникає в повітрі під впливом сильного електричного поля, коли відбувається ударна іонізація газу. Розряд має вигляд китиці.

Плазма – це газ у стані з високим ступенем іонізації. Плазма, наприклад, утворюється в позитивному стовпі тліючого розряду і в головних каналах іскрового розряду. У нейтральній плазмі концентрація електронів і позитивних іонів однакова.

Світний розгалуджений канал плазми в іскровому розряді називається *стримером*. В основі розвитку стримера в газі лежить *ударна іонізація* і *фотоіонізація*.

Плазму поділяють на *низько-* і *високотемпературну*. Низькотемпературною вважається плазма при температурах нижче 10^5 K , а високотемпературною – плазма при температурах порядку $10^6 - 10^8\text{ K}$.

Спектр випромінювання низькотемпературної плазми в залежності від її розрідження, є *лінійчастим*, як у одноатомних газів, або *полосатим*, як у молекулярних газів. Спектр випромінювання високотемпературної плазми є *суцільним*, як у твердих і рідких речовин.

У природі плазма зустрічається у космічних тілах. Надра зірок і Сонця складаються з водневої плазми. Завдяки своїм специфічним властивостям плазма розглядається як *четвертий стан речовини*.

Високотемпературна плазма використовується *плазмових двигунах*. Низькотемпературна плазма знайшла застосування в *магнітогідродинамічних генераторах* – високо економічних джерелах струму.

Низькотемпературна плазма широко застосовується в різних газорозрядних приладах: *газотрони*; *тиратрони*.

Газотрон – двохелектродна лампа (діод) з розжарюваним катодом, однак, на відміну від вакуумного діода, всередині його балона є газ (пара ртуті або аргон).

Тиратрон – триелектродна лампа заповнена газом. Тиратрон поєднує в собі переваги газотрона – малий внутрішній опір і властивості тріода – можливість керувати силою анодного струму зміною напруги на сітці.

Блискавка – це плазмовий шнур, що замикає наелектризовані хмари або наелектризовану хмару і Землю. Сила струму у блискавці досягає 500000 A , а різниця потенціалів між хмарою і Землею 100000000 V . Блискавка є типовим прикладом іскрового розряду між хмарами або хмарою (-) і Землею (+). «Тріск» стає в цьому випадку *громом*.

Грім – акустичний ефект, що супроводжує електричні розряди блискавки під час грози (гуркіт і тріск, що супроводять електричні розряди в атмосфері).

Час від удару блискавки до звуку грому помножений на швидкість звуку дає *відстань* до блискавки.

Звук подібний до грому супроводжує перехід літального апарату звукового бар'єру, спричинений *ударною хвилею*.

МАГНІТНІ ЯВИЩА

Магнітне поле та його характеристики

Магнітне поле – це вид матерії (вид електромагнітного поля), основною особливістю якого є дія на рухомі тіла або частинки, які мають електричний заряд та на частинки, які мають магнітний момент. Або *магнітне поле* виникає у просторі, що оточує струми.

Взаємодії між провідниками з струмом, тобто взаємодії між рухомими електричними зарядами, називають *магнітними*. Сили, з якими провідники із струмом діють один на одного, називають *магнітними силами*.

Виявлено, що:

- 1) рухомі електричні заряди створюють магнітне поле;
- 2) магнітне поле, у свою чергу, діє на рухомі електричні заряди;
- 3) змінне магнітне поле породжує в навколишньому просторі змінне електричне поле, тобто ці поля завжди взаємопов'язані і, змінюючись, породжують одне одного;
- 4) магнітне поле носить вихровий характер.

Отже, *магнітне поле існує навколо всякого провідника з струмом, тобто навколо рухомих електричних зарядів*. Подібно до електричного поля *магнітне поле існує реально, незалежно від нас, від наших знань про нього*.

Магнітне поле виявляє орієнтуючу дію на рамку із струмом. Однорідне магнітне поле, тобто поле, однакове в усіх точках простору.

Магнітне поле діє на *магнітну стрілку*, відхиляючи її. Магнітна стрілка має *два полюси: північний і південний*. Лінію, що сполучає кінці (полюси) магнітної стрілки, називають *віссю магнітної стрілки*. Магнітна стрілка є головною частиною *компасу*.

Однорідним магнітним полем називається поле, в кожній точці якого вектор магнітної індукції однаковий за величиною і напрямком.

Векторну величину, що характеризує магнітне поле, називають вектором магнітної індукції.

Крім магнітної індукції \vec{B} вводиться також друга векторна характеристика магнітного поля, яка називається *напруженістю*.

Лінії, вздовж яких у магнітному полі розміщуються осі магнітних стрілок, називають *магнітними лініями магнітного поля*. Магнітні лінії магнітного поля струму – це *замкнені криві*, які охоплюють провідник. Напрямок магнітних ліній магнітного поля струму пов'язаний із напрямком струму в провіднику. Магнітні лінії: *лінії магнітної індукції і лінії напруженості магнітного поля*.

Лініями магнітної індукції називають криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора \vec{B} в цих точках поля. Лінії магнітної

індукції аналогічні лініям напруженості електростатичного поля.

Магнітні силові лінії ніколи *не перетинаються*, тому що їх перетин означав би, що одне і теж магнітне поле в точці перетину має два різних напрямки, що не має смислу.

Густину магнітних ліній вибирають такою, щоб число ліній, що пересікають деяку одиничну площину, розташовану перпендикулярну до них, дорівнювало б величині індукції магнітного поля в цьому місці. Чим *густіше* будуть розташовані в деякій області магнітні лінії, тим *більша* там індукція магнітного поля.

Магнітне поле зображають графічно лініями *магнітної індукції*, або *лініями напруженості*, дотичні до яких у кожній точці збігаються за напрямом з вектором \vec{H} . Лінії напруженості магнітного поля аналогічні лініям індукції електростатичного поля.

Важлива особливість ліній магнітної індукції полягає в тому, що вони не мають ні початку, ні кінця. Ці лінії завжди замкнуті.

Поля із замкнутими силовими лініями називають *вихровими*. Магнітне поле – *вихрове поле*.

Замкненість ліній магнітної індукції – це фундаментальна властивість магнітного поля. Вона полягає в тому, що магнітне поле не має джерел. *Магнітних зарядів, схожих на електричні, немає в природі.*

Магнітні лінії прямого струму представляють собою концентричні кола, що охоплюють провідник, з центром на провіднику з струмом.

Магнітні лінії прямого струму можна знайти за правилом правого гвинта (буравчика): *якщо поступальний рух правого гвинта направити за струмом в провіднику, то напрямок обертання його головки покаже напрямок магнітних ліній*. Або правилом правої руки: *якщо великий палець правої руки, відставлений на 90° , спрямувати в напрямку струму в провіднику (на себе), а чотирьома пальцями обхватити провідник із струмом, то вони покажуть напрям магнітних ліній навколо провідника*.

Соленоїд - котушка провідника із струмом.

Всередині довгої котушки з струмом магнітні лінії мають вигляд паралельних прямих, які виходячи з котушки, згинаються і охоплюють її, замикаючись самі на себе. Котушка з струмом є *електромагнітом*, подібним до *полосового магніту*.

Ділянку, де лінії магнітної індукції спрямовані із соленоїда, приймають за *північний полюс соленоїда* (N), ділянку, де лінії входять в соленоїд – *південний полюс* (S). Якщо до соленоїда піднести магнітну стрілку, то вона повернеться до котушки своєю північною стороною, оскільки притягуються різнойменні полюси магнітів, а однойменні – відштовхуються (як і електричні заряди).

Напрямок ліній магнітної індукції в соленоїді можна визначити за

правилом правої руки: якщо чотири пальці правої руки розмістити за напрямком струму в торці котушки, то напрямок великого пальця, відставленого на 90° , співпаде з напрямом вектора індукції магнітного поля всередині котушки.

Для вимірювання магнітної індукції на практиці користуються приладами – *магнітометрами*. У приладах замість контура із струмом використовують невеликий магніт. Про магнітну індукцію поля дістають уявлення за моментом сил, що діють на магніт з боку магнітного поля.

Тіла, які довго зберігають намагніченість, називаються *постійними магнітами*, або просто *магнітами*. Магніти можуть мати найрізноманітнішу форму. Ті місця магніту, де виявляються найсильніші магнітні дії, називають *полюсами магніту*. Будь-який магніт, так як і магнітна стрілка, має два полюси: *північний* (N) і *південний* (S).

Різнойменні магнітні полюси притягуються, однойменні – відштовхуються.

Електромагнітом називають котушку із залізним осердям усередині. Електромагніти бувають різної форми. Вони широко використовуються у техніці завдяки своїм особливим властивостям: швидко розмагнічуються при вимиканні струму; можна виготовляти найрізноманітніших розмірів; під час роботи можна регулювати його магнітну дію, змінюючи силу струму в котушці.

Навколо Землі існує магнітне поле і магнітна стрілка встановлюється вздовж його магнітних ліній. Магнітних полюсів у земної кулі два: *Північний* і *Південний*. *Південний магнітний полюс Землі* лежить поблизу *Північного географічного полюса* на 75° північної широти і 99° західної довготи. Тобто *Південний магнітний полюс* віддалений від *Північного географічного полюса* приблизно на 2100 км. *Північний магнітний полюс Землі* лежить поблизу *Південного географічного полюса*, а саме на $66,5^\circ$ південної широти і 140° східної довготи.

Отже, магнітні полюси Землі не збігаються з її географічними полюсами.

Кут α між напрямком на *Північний географічний полюс* і *Південний магнітний* називається *магнітним схиленням*.

Кут β між вектором \vec{B} магнітного поля Землі і землею називають *магнітним нахилом*.

Кути α і β повністю визначають напрямок вектора індукції магнітного поля Землі в даній точці земної кулі.

Земна магнітосфера – це власне магнітне поле Земної кулі, що простягається на декілька десятків тисяч кілометрів.

Радіаційний пояс – це область простору, в якій частинки рухаються навколо силових ліній магнітосфери, при цьому не попадаючи на поверхню

Землі, вони як би навіваються на магнітні лінії і здійснюють коливання від одного полюса до другого на відстанях в десятки тисяч кілометрів від земної поверхні.

Електровимірювальними приладами називають прилади, що дозволяють вимірювати як характеристики струму (його силу, напругу, потужність), так і параметри самого кола.

Дія електровимірювальних *стрілочних приладів* ґрунтується на обертанні рухомої частини приладу і зв'язаної з ним стрілки навколо своєї осі. Момент сил, який викликає обертання рухомої частини і зв'язаної з нею стрілкою приладу, називають *обертальним моментом*. Момент сил, який чинить протидію стрілці, для того, щоб вона відхилялась не безмежно, а на кут відхилення, що відповідав би вимірювальній величині називають *протидіючим моментом*.

Всі електровимірювальні прилади за принципом їх дії поділяються на: *магнітоелектричної системи, електромагнітної системи, електродинамічної системи, індукційної системи, електростатичної системи, теплової системи, електронної системи.*

Принцип дії *приладів магнітоелектричної системи* ґрунтується на взаємодії провідника зі струмом і магнітного поля. Магнітоелектричні прилади придатні для вимірювань лише в колах постійного струму, що, безумовно, є їх недоліком. Перевагою цих приладів є мале споживання енергії і висока чутливість.

Принцип дії *приладів електромагнітної системи* ґрунтується на втягуванні залізного осердя котушкою зі струмом. Електровимірювальний прилад менш точний за магнітоелектричний, але простіший за конструкцією і придатний для вимірювання як постійного, так і змінного струму.

Принцип дії *приладів електродинамічної системи* ґрунтується на взаємодії провідників зі струмом. Електродинамічними приладами вимірюють як постійний, так і змінний струм. Шкала цих приладів нерівномірна. Приладами електродинамічної системи можна вимірювати потужність як у колах постійного так і змінного струму.

Прилади *індукційної системи* характеризуються тим, що принцип їхньої дії ґрунтується на взаємодії вихрових індукційних струмів в рухомій частині приладу (алюмінієвий диск, насаджений на вертикальну вісь) із змінним магнітними потоками нерухомих електромагнітів (один з електромагнітів має обмотку з товстого ізольованого дроту, яка є обмоткою струму і вмикається в коло послідовно з навантаженням; другий електромагніт має обмотку з тонкого ізольованого дроту, яка є обмоткою напруги і вмикається в коло паралельно навантаженню.) Серед приладів індукційної системи широке застосування мають лічильники електричної енергії змінного струму.

Прилади *електростатичної системи* побудовані на принципі взаємодії рухомих і нерухомих електрично заряджених пластин. Електростатичні прилади використовуються головним чином для вимірювання напруги в колах постійного і змінного струмів в широкому діапазоні частот.

Прилади *електронної системи* являють собою поєднання вимірювальної схеми, яка містить електронні лампи або напівпровідникові прилади, і вимірювального механізму магнітоелектричної електростатичної системи. Прилади електронної системи використовуються для вимірювання в радіоелектронних схемах напруг і частот значних діапазонів.

Цифрові прилади невідому величину, що вимірюється, визначають в дискретно-цифровій формі за допомогою цифрових індикаторів. Цифрові прилади мають ряд переваг над звичайними, основні з яких: висока точність і швидкість вимірювання, об'єктивність і повна автоматизація процесу вимірювання, можливість передачі результатів на відстані тощо. Недоліки: складність схеми, порівняно великі габарити, менша надійність, ніж звичайних. Найбільш поширеними цифровими приладами є цифрові вольтметри.

Універсальні цифрові вольтметри призначені для автоматичного вимірювання сталої і змінної напруг, струму та активних опорів. Широко застосовуються в електроніці, для наукових, ремонтних і регламентних робіт та для перевірки приладів нижчого класу точності.

Якість електровимірювальних приладів визначається *чутливістю, похибками вимірювання, реагуванням на зовнішні електричні і магнітні поля та зміну температури, межами вимірювань, тривалістю щодо перевантажень* тощо.

Чутливістю електровимірювальних приладів називають фізичну величину, яка вимірюється відношенням лінійного або кутового зміщення покажчика приладу $\Delta\alpha$ до зміни вимірювальної величини ΔA_{\max} , яка зумовила це зміщення:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta A_{\max}}.$$

Величина, обернена до чутливості, дістала назву ціни поділки приладу.

$$C = \frac{1}{S}.$$

Для характеристики точності електровимірювальних приладів використовують так звані *зведені похибки*.

Величина

$$\gamma_{\text{зв}} = \frac{\Delta A_{\max}}{A_{\max}} \cdot 100\%,$$

виражається у відсотках, називається *зведеною похибкою* приладу. Всі ці числа являють собою відношення максимально можливої похибки приладу ΔA_{\max} (абсолютна похибка вимірювальної величини) до максимального значення величини A_{\max} (верхня межа вимірювань (шкали) приладу (його номінальне значення)), яку можна виміряти даним приладом. Чим менша зведена похибка приладу, тим точніші його покази.

Важливою характеристикою точності виміру електричної величини за допомогою будь-якого електровимірювального приладу є *клас точності*. За класом точності прилади бувають: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 і 4,0 (вісім класів точності).

За показчиком класу точності, нанесеним на шкалу вимірювального приладу, визначають *абсолютну похибку вимірювання*

$$\Delta A_{\max} = \frac{\gamma_{\%} A_{\max}}{100}.$$

Прилади класів точності 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 використовуються, головним чином, для точних лабораторних вимірювань і називаються *прецизійними*. Прилади класів 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 мають назву *технічних*.

Магнітне поле діє з деякою силою на кожний провідник із струмом, розміщений у цьому полі. Явище обертання провідника із струмом у магнітному полі використовують у будові *електричного двигуна*.

Електричним двигуном називають пристрій, в якому електрична енергія струму перетворюється в механічну енергію обертання. Будова: колектор; щітки – провідні пластини; обмотка; якір – сталевий циліндр з пазами для вкладання в них обмоток; індуктор – постійний або електромагніт (частіше всього) зі сталевим сердечником для підсилення магнітного поля.

Кутова частота обертання рамки (якоря):

$$\omega = \frac{BIS}{J},$$

де B - магнітна індукція; I - сила струму; S - площа рамки; J - момент інерції рамки (якоря), що залежить від її розмірів і форми.

Телефон – прилад, який дає змогу передавати звук на далекі відстані (від грецьких слів: *теле* – далеко, *фоне* – звук). Будова: корпус; мембрана; вугільна колодка; вугільний порошок; електрод. Електричний струм у колі проходить через мембрану, вугільну колодку, вугільний порошок і електрод.

Під дією змінного магнітного поля мембрана телефону коливається й коливає прилеглі до неї шари повітря. Внаслідок цього слухач чує в трубці ті слова і фрази, які в цей час промовляє в *мікрофон* його співбесідник.

Мікрофоном називають пристрій, який перетворює звукові хвилі в електричний струм, що змінюється із звуковою частотою.

Мікрофон – прилад, чутливий до слабких звуків (від грецьких слів: *мікро* – малий, *фоне* – звук). Будова: корпус; мембрана; вугільний порошок – змінює свій електричний опір в процесі коливання мембрани; джерело постійного струму. Тобто *мікрофон* - пристрій, в якому мембрана вібрає під дією звукових коливань, а опір вугільного порошку в такт коливанням мембрани, змінює свій опір.

Гучномовці – прилади для збудження звукових хвиль під дією електричного струму, сила якого змінюється із звуковою частотою. Будова: звукова котушка; мембрана; дифузор; постійний магніт.

Першокласні гучномовці відтворюють без значних спотворень звукові коливання в діапазоні 40-15000 Гц. Недоліком усіх гучномовців є малий коефіцієнт корисної дії. Вони випромінюють лише 1-3% усієї підведеної до них енергії.

Мас-спектрографи – це прилади, що дають змогу розділяти заряджені частинки за їх питомим зарядом, тобто відношення заряду частинки до її маси і за знайденими результатами точно визначати маси частинок. Принцип дії цих приладів ґрунтується на дії магнітного поля.

Мас-спектрометри – це прилади, що призначені для розділення іонізованих молекул і атомів за їхніми масами. Принцип роботи їх ґрунтується на дії електричних і магнітних полів на пучки іонів, що рухаються у вакуумі. У мас-спектрометрах реєстрацію іонів проводять на основі залежності сили іонного струму від маси іонів.

Основною характеристикою мас-спектрометрів є їхня *роздільна здатність* R як відношення маси іона m до ширини спектрального піка δ_m (в атомних одиницях маси):

$$R = \frac{m}{\delta_m}$$

Якщо $R < 10^2$, то мас-спектрометри мають низьку роздільну здатність, якщо $R \sim 10^2$, то мас-спектрометри мають низьку роздільну здатність, якщо $R \sim 10^2 - 10^3$ – середню, $R \sim 10^3 - 10^4$ – високу і $R > 10^5$ – дуже високу роздільну здатність.

Чутливістю мас-спектрометрів називають відношення сили струму, що створюється іонами даної маси досліджуваної речовини, до парціального тиску цієї речовини в іонному джерелі. Сучасні мас-спектрометри мають чутливість близько $10^{-8} - 10^{-5} \frac{A}{Pa}$.

Відносною чутливістю називають ту мінімальну кількість речовини, яка може бути виявлена за допомогою мас-спектрометра. Її значення становить близько $10^{-7} - 10^{-3}\%$.

За допомогою мас-спектрометра вчені визначили маси всіх елементів таблиці Менделєєва.

Прискорювачами заряджених частинок називають пристрої, з допомогою яких зарядженим частинкам надають більшу енергію. Розрізняють *лінійні* і *циклічні* прискорювачі.

В *лінійних прискорювачах* частинки рухаються вздовж силових ліній електричного поля прямолінійно з прискоренням під дією електричної сили. Заряджені частинки, рухаючись з прискоренням, випромінюють електромагнітні хвилі, але при цьому втрачають енергію, що надається їм електричним полем. Недолік: велика їхня довжина, яка необхідна для розгону частинок.

Циклічні прискорювачі – *циклотрон, фазотрон, синхротрон і синхрофазотрон*.

Циклотрон – прискорювач заряджених частинок, в якому у будові використовується незалежність періоду обертання від швидкості і кінетичної енергії частинки. Період (час одного оберту) дорівнює:

$$T = \frac{l}{v}; T = \frac{2\pi m}{eB},$$

де l - довжина кола, яке описує частинка за один оберт: $l = 2\pi R = 2\pi \frac{mv}{eB}$

; R - радіус кола по якому рухається частинка: $R = \frac{mv}{eB}$.

Циклотрон складається з: *інжектора* (джерело частинок); *дуантів* (напівкруглі пустотілі електроди).

Фазотрон - прискорювач заряджених частинок, в якому індукція магнітного поля, а значить, і швидкість частинок в дуантах, залишаються постійними, а частоту ввімкнення електричного поля змінюють у відповідності з часом підльоту частинки до зазору між дуантами.

Синхротрон – прискорювач, в якому збільшують індукцію магнітного поля при незмінних періоді обертання і радіусі орбіти частинки.

Прискорювач, що поєднує в собі принципи дії циклотрону і фазотрону, називається *синхрофазотроном*. Синхрофазотрон має форму кільця великих розмірів. Частинки рухаються у вакуумній камері, розміщеній усередині системи електромагнітів. Траєкторія кожної частинки складається з окремих коротких прямолінійних ділянок і дуг кола.

Синхрофазотрон – релятивістський прилад. Найбільший синхрофазотрон було побудовано у Радянському Союзі біля міста Серпухова.

На принципі магнітогідродинамічного ефекту працює *МГД-генератор* або *магнітогідродинамічний генератор*. *Магнітогідродинамічний генератор* – джерело струму, в якому тепла енергія безпосередньо перетворюється в електричну.

Такий генератор є джерелом енергії без будь-яких рухомих механічних

вузлів і деталей. Він є магнітодинамічним перетворювачем енергії. У МГД-генераторі плазма, що є потоком позитивних і негативних іонів, під дією сили Лоренца поділяється на два різнойменні потоки.

МГД-генератор складається з: нагрівача; робочого тіла; МГД-каналу; електродів; магнітної системи.

В нагрівачі робоче тіло – тверде паливо – перетворено в плазму, тобто газ, майже повністю іонізований.

Явище виникнення у твердих провідниках зі струмом, вміщених у магнітне поле, електричного поля в напрямі, перпендикулярному до напрямку струму й індукції магнітного поля, називають *ефектом Холла*. Виникнення між гранями електричного поля напруженістю \vec{E}_x , називають *холівською напруженістю*.

$$E_x = \alpha_x jB,$$

де α_x - називають *сталю Холла*, яка є основною кількісною характеристикою ефекту Холла, неоднаковою для різних провідників і напівпровідників.

Магнітне поле у речовині

За сучасними поглядами магнітні властивості речовини зумовлені трьома причинами:

- 1) орбітальним магнітним моментом електронів, який виникає внаслідок їхніх рухів навколо ядер;
- 2) магнітним моментом електронів, який перебуває у певному співвідношенні з їхнім власним механічним моментом – спіном. *Спином електрона* називають його власний механічний момент імпульсу;
- 3) власним магнітним моментом атомних ядер.

Речовини в зовнішньому магнітному полі змінюються так, що самі стають джерелами магнітного поля, їх називають *магнетиками*. Набуття магнітних властивостей речовиною під дією магнітного поля називають *намагнічуванням магнетика*. Магнетики поділяють на три класи: *діамагнетики*, *парамагнетики* і *феромагнетики*. Більшість речовин у зовнішньому полі намагнічуються слабо (діа- і парамагнетики). Сильні магнітні властивості мають тільки феромагнітні речовини (залізо, нікель, кобальт, їхні сплави).

Значна кількість магнетиків після припинення дії зовнішнього магнітного поля втрачає намагнічення. Однак є речовини, в яких намагнічення залишається на довгий час, і тільки механічними діями або нагріванням їх можна розмагнітити. Такі намагнічені тіла називають *постійними магнітами*.

Речовина, у якої всі вектори індукції магнітних полів, створених орбітальними електронними струмами атома, повністю розорієнтовані у

відсутності зовнішнього магнітного поля, називаються *діамагнетиками*. Інакше: речовини, в атомах яких орбітальні і спінові магнітні моменти електронів, якщо немає зовнішнього магнітного поля, є взаємно скомпенсованими, називають *діамагнетиками*.

Діамагнетики – це речовини, що послаблюють зовнішнє магнітне поле, їхня магнітна проникність $\mu \leq 1$.

Властивість речовин намагнічуватись протилежно до зовнішнього магнітного поля називають *діамагнетизмом*. Інакше: явище виникнення магнітного поля, створеного індукційними електричними струмами в атомах речовини і направленою проти зовнішнього магнітного поля, в яке поміщена ця речовина, називається *діамагнетизмом*.

Діамагнетизм, або *діамагнітний ефект*, властивий всім речовинам, оскільки він пов'язаний з виникненням додаткових колових рухів електронів в атомах речовин і зміною їхньої частоти обертання під час внесення в зовнішнє поле.

Речовини, в атомах яких вектори індукції магнітних полів орбітальних електронних струмів мають деяку перевагу в орієнтації у межах кожного атома навіть тоді, коли зовнішнє магнітне поле відсутнє, при цьому результуюче магнітне поле кожного атома у них відмінне від нуля, то такі речовини називаються *парамагнетиками*. Явище виникнення у атома власного магнітного поля, відмінного від нуля і у відсутності зовнішнього поля, називається *парамагнетизмом*.

Парамагнетики – це речовини, які в зовнішньому магнітному полі намагнічуються вздовж поля і дещо підсилюють його ($\mu \geq 1$).

Якщо парамагнетик внести у зовнішнє магнітне поле, то всі вектори \vec{B} магнітних полів окремих атомів отримають переважачу орієнтацію в напрямку зовнішнього магнітного поля \vec{B}_0 .

Явище виникнення власного магнітного поля у великих груп атомів речовини, називається *феромагнетизмом*. Речовини, що володіють феромагнетизмом, називаються *феромагнетиками*.

Феромагнетики – це речовини, що мають доменну структуру і значно підсилюють зовнішнє магнітне поле ($\mu \geq 1$).

Домен – структурні групи атомів, які під впливом квантовомеханічних взаємодій мають орієнтовані строго в одному напрямі електродипольні (сегнетоелектриків) або магніtodипольні (феромагнетиків) моменти. Тобто *домени* – це області самодовільного намагнічування феромагнетика.

Якщо намагнічений феромагнетик винести із зовнішнього магнітного поля, то на відміну від діа- і парамагнетиків він не розмагнітиться, а буде *зберігати намагніченість* на протязі довгого часу. Це пояснюється дією між доменами сил, подібних до сил тертя, які називаються *обмінними*

силами.

Сила, з якою утримується залишкове намагнічування в феромагнетикі називається *затримуючою або коерцетивною силою*.

Зміна розмірів феромагнетиків при їх намагнічуванні називається *магнітострикцією*.

Магнітне насичення – намагнічування спочатку швидко зростає зі збільшенням \vec{B}_0 , а потім при досягненні деякого максимального значення I_H намагнічення перестає залежати від індукції \vec{B}_0 . Крива залежності $I = f(B_0)$ називається *основною кривою намагнічування*.

Явище гістерезису – відставання зміни магнітної індукції у даному середовищі \vec{B} від зміни магнітної індукції у вакуумі \vec{B}_0 при розмагнічуванні феромагнетика.

Петля гістерезису – це замкнена петля, яка утворюється в результаті спізнання змін намагнічування порівняно зі зміною індукції намагнічуючого поля кривої циклічного намагнічування феромагнетика або *петля гістерезису* – це петля, що утворюється при намагнічуванні і перемагнічуванні феромагнетика. Коли зміна намагнічування відбувається від насичення в одному напрямі до насичення в іншому, петля гістерезису називається *максимальною*. В залежності від значення затримуючої сили феромагнетика поділяються на *магнітом'які* і *магнітожорсткі*.

Магнітом'які феромагнетики – це феромагнітні речовини, що мають вузьку петлю гістерезису і малі значення затримуючої сили (залізо, кремнієва сталь). *Магнітожорсткі феромагнетики* – це феромагнітні речовини, що мають широку петлю гістерезису і відповідно великі значення затримуючої сили (вуглецева сталь, і спеціальні магнітні матеріали).

Температура, при якій повністю втрачається остаточна намагніченість феромагнетика називається *точкою Кюрі* ($Fe - 768^\circ C$, $Ni - 365^\circ C$, $Co - 1140^\circ C$).

Принцип магнітного запису інформації полягає на орієнтації частинок феромагнетика у зовнішньому магнітному полі і її збережені. Для здійснення магнітного запису феромагнетик подрібнюють до стану, коли окремі частинки стають *однодоменними* (для заліза розміри частинок - $3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$).

Напівхвильовою областю називають область, в якій при синусоїдальному сигналі запису інформації довжина кожної області однонаправленого намагнічування дорівнює половині довжини хвилі запису.

Смуга на стрічці, намагнічена у процесі записування, називається *доріжкою*.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Індукційне електричне поле

Відомо, що змінне магнітне поле збуджує в провіднику, розташованого в ньому, *індукційне електричне поле*.

Індукційне електричне поле не є потенціальним, а воно подібно магнітному, є вихровим.

Явище виникнення електричного струму в провіднику, який перетинає магнітні лінії, називається *електромагнітною індукцією*, а наведений струм, що виникає при цьому – *індукційним*. (Слово «індукція» з латинського – наведення, збудження). Інакше: явище виникнення індукційного струму в контурі при зміні магнітного потоку, що перетинає цей контур, називається *електромагнітною індукцією*.

Явище електромагнітної індукції – це збудження індукційного електричного поля безпосередньо змінним магнітним полем.

М. Фарадей показав, що коли замкнути струм в одній котушці, то в другій, сусідній з нею, котушці замкнутій на гальванометр, виникає короткочасний струм.

Індукційний струм виникає в тих випадках, коли:

- 1) котушки деформують або переміщують одну відносно одної;
- 2) коло замикають або розмикають;
- 3) змінюють реостатом R струм I_1 .

У першому випадку механічна енергія перетворюється на електричну. У другому й третьому випадках електричну енергію переносить з першого контуру в другий магнітне поле струму I_1 .

Електричне поле, що виникає в результаті зміни магнітного поля і не пов'язане з електричними зарядами та його лінії напруженості не починаються на них, тобто вони взагалі ніде не починаються і не закінчуються, вони замкнуті, як і лінії індукції магнітного поля – *вихрове електричне поле*.

Робота вихрового електричного поля з переміщенням одиничного позитивного заряду на замкнутому шляху являє собою ЕРС індукції в нерухомому провіднику.

Бетатрон – це прискорювач електронів. Його дія ґрунтується на тому, що збуджене змінним магнітним полем вихрове електричне поле може виявитися в дії на окремі заряджені частинки у вакуумі. Будова: вакуумна камера; електромагніт (у зазорі якого розміщена вакуумна камера).

Індукційні струми в суцільних провідниках – *вихрові струми (струми Фуко)*. *Струми Фуко* – блукаючі кільцеві струми всередині масивного провідника, який міститься в змінному магнітному полі.

Кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу вихровими

струмами, прямо пропорційна квадрату частоти зміни магнітного поля.

Явище виникнення в котушці електрорушійної сили індукції внаслідок зміни власного магнітного потоку називається *самоіндукцією*. Інакше: явище виникнення ЕРС індукції і індукційного струму в контурі внаслідок зміни струму, що тече в цьому контурі, називається *явищем самоіндукції*.

ЕРС індукції, що виникає при зміні струму в контурі, називається *ЕРС самоіндукції* ξ_s , індукційний струм в ньому – *струмом самоіндукції* I_s .

ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі при зміні в ньому струму, за законом Фарадея дорівнює швидкості зміни магнітного потоку скрізь цей контур, взятий із знаком «мінус»:

$$\xi_s = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Результуючий струм в колі, що виникає при його замиканні, називається *екстраструмом замикання* I_e .

$$I_e = I_1 - I_s,$$

де I_1 - струм в колі при його замиканні.

Результуючий струм на ділянці дроселя, називається *екстраструмом розмикання*, в тому випадку, якщо він буде дорівнювати сумі струмів I_1 і I_s :

$$I_e = I_1 + I_s,$$

де I_1 - струм в колі при його розмиканні.

Дросель – це котушка з сердечником.

Вивчені електричні і магнітні явища переконують у тому, що між ними існує глибокий взаємний зв'язок. Аналіз дослідів з електричним і магнітним полями дає підстави для висновку, що поодиноці ці поля не існують. Існує їх лише єдність – *електромагнітне поле*.

Електромагнітне поле – це вид матерії, якому властиві: неперервність розподілу в просторі; дискретність структури; здатність поширюватися в просторі зі швидкістю, наближеною до $3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$; силова дія на електрично заряджені частинки або тіла, яка залежить від швидкості їх руху.

Інакше: сукупність нерозривно зв'язаних електричного і магнітного полів називається *електромагнітним полем*.

Електромагнітне поле описується двома основними векторами: \vec{E} - напруженістю електричного поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q};$$

\vec{B} - магнітною індукцією магнітного поля

$$B = \frac{F_{\text{магн. max}}}{q\vartheta}.$$

Сила, з якою електромагнітне поле діє на електричний заряд, - *узагальнена сила Лоренца*:

$$\vec{F}_{\text{уз.Л}} = \vec{F}_{\text{ел.}} + \vec{F}_{\text{магн.}}; \quad \vec{F}_{\text{уз.Л}} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}],$$

$$\text{де } \vec{F}_{\text{ел.}} = q\vec{E}; \quad \vec{F}_{\text{магн.}} = q[\vec{v} \times \vec{B}].$$

Теорія Максвелла – це теорія електромагнітного поля, що встановлює зв'язок між векторами, які описують електромагнітне поле, з одного боку, і джерелами та вихорами цих векторів – з другого. Ці зв'язки кількісно виражають *рівняння Максвелла*.

Джерела вектора – об'єкти, на яких лінії вектора починаються або закінчуються. Для векторів: \vec{E} - вільні і зв'язані заряди; \vec{B} - джерела не має – магнітне поле вихрове.

Вихори вектора – об'єкти, навколо яких лінії вектора замикаються. Для векторів: \vec{E} - змінні магнітні поля (електромагнітна індукція); \vec{B} - макро- і мікроструми («струми зміщення»), змінні електричні поля (магнітоелектрична індукція).

У певних системах відліку не виявляється магнітна або електрична складова електромагнітного поля, і тоді поле, відповідно, називається *електричним* або *магнітним*.

Навколо зарядженої кульки, що перебуває у спокої в системі «Земля» (джерело \vec{E}), електромагнітне поле називається *електричним* (немає вихорів \vec{B}).

Навколо постійного магніту, що перебуває у спокої в системі «Земля» (мікроструми – вихори \vec{B}), електромагнітне поле називається *магнітним полем* (немає джерел і вихорів \vec{E}).

У системі, що рухається відносно системи «Земля», поля \vec{E} і \vec{B} змінюється (вихори \vec{B} і \vec{E}) – *поле електромагнітне*.

ЗМІННИЙ СТУМ

Змінним струмом називають такий струм, який періодично змінюється за значенням і напрямом. Змінний струм у електричному колі – це вимушені електромагнітні коливання, які виникають під дією зовнішньої електрорушійної сили (ЕРС), що періодично змінюється. У промислових колах змінного струму і напруга змінюють гармонічно з частотою 50 Гц . Змінна напруга на кінцях кола створюється генераторами на електростанціях. Найпростішою моделлю генератора змінного струму є дротяна рамка, яка обертається в однорідному магнітному полі з постійною кутовою швидкістю.

Однією з важливих галузей застосування явища електромагнітної

індукції є робота електричних генераторів, в яких механічна енергія перетворюється в електричну.

Генератор складається з: корпусу; турбіни; кілець; щіток; збудника; двох котушок, одна з яких вміщена в пазах нерухомого осердя з магнітного матеріалу (*статора*), а друга – у пазах рухомого осердя (*ротора*). Одна з цих обмоток призначена для створення магнітного поля (*індуктор*), а друга є робочою, у ній індукується змінна ЕРС (*якір*).

Частота обертання турбіни генератора:

$$\nu = pn,$$

де p - число пар полюсів генератора; n - число обертів рамки за секунду.

Резонансом в колі змінного струму називається явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань сили струму в коливальному контурі внаслідок збігу частоти зовнішньої змінної напруги з власною частотою коливального контуру.

Умови електричного резонансу:

$$R_L = R_c; \omega L = \frac{1}{\omega C}; \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Циклічна частота при, якій настає резонанс називається *резонансною*.

Резонанс напруг виникає при послідовному з'єднанні активного опору R , котушки індуктивності L , конденсатора ємності C : в цьому випадку спад напруги на кінцях котушок індуктивності дорівнює спаду напруги на обкладках конденсатора, фази протилежні.

$$U_{0L} = U_{0C}; I_0 \omega L = \frac{I_0}{\omega C}.$$

Напруга при резонансі:

на котушці індуктивності

$$U_{0L} = I_0 \omega L; U_{0L} = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}};$$

на конденсаторі

$$U_{0C} = I_0 \frac{1}{\omega C}; U_{0C} = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Резонанс струмів виникає при паралельному з'єднанні котушки індуктивністю L , конденсатора ємністю C і при умові, що активний опір R прямує до нуля: в цьому випадку сила струму в розгалуженнях однакова, фази протилежні, при умові рівності індуктивного і ємнісного опорів ($R_L = R_c$).

У техніці й побуті застосовують переважно змінний струм. Але в багатьох випадках буває потрібний і постійний струм. Електродвигуни постійного струму дають змогу плавно регулювати швидкість обертання і

розвивають великий обертаючий момент під час запускання. Ці властивості роблять їх незмінними на транспорті (електровози, трамваї, електрокари). Постійна напруга потрібна для живлення більшості радіотехнічних пристроїв.

Постійний струм найчастіше дістають із змінного за допомогою спеціальних пристроїв – *випрямлячів* і *генераторів постійного струму*.

Постійний струм найчастіше дістають із змінного за допомогою спеціальних пристроїв – *випрямлячів*. Випрямлячі поділяються на *однонапівперіодні* і *двохнапівперіодні*.

Однонапівперіодний випрямляч – це пристрій у якому діод пропускає струм тільки півперіода кожного з коливань напруги.

Двохнапівперіодний випрямляч – це пристрій, який складається з двох діодів, і у якому кожен півперіод коливань працює один із діодів, в залежності від полярності напруги.

Генератор постійного струму – це пристрій, який служить для добування постійного струму. Найпростіша модель генератора постійного струму відрізняється від моделі генератора змінного струму тільки особливим автоматичним перемикачем, який називається *колектором*. *Колектор* – це два півкільця, закріплені на осі генератора за допомогою ізолюючого циліндра. До півкільць притискаються пружні пластини – *щітки*.

Головною технічною перевагою змінного струму порівняно з постійним є те, що напругу і силу змінного струму можна *змінювати без істотних втрат потужності*.

Загальна електрична мережа, до якої приєднанні споживачі називається *енергосистемою*.

З допомогою *трансформатора* є можливість передавати великі потужності струму на значні відстані з порівняно малими втратами енергії.

Прилади, за допомогою яких перетворюється напруга змінного струму, називають *трансформаторами*. Трансформатор складається із замкнутого феромагнітного осердя, на яке натягнуто дві (або більше) обмотки (котушки) з різним числом витків. Та обмотка, яка вмикається до джерела змінної напруги U_1 називається *первинною*, а та, з якої знімається вже змінена напруга U_2 – *вторинною*.

Дія трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, тобто на явищі *взаємоіндукції*. *Взаємоіндукція* – це явище виникнення ЕРС електромагнітної індукції в контурі при зміні магнітного потоку, що пронизує сусідній контур.

Напруги відповідно на вході і виході трансформатора

$$U_1 = I_1 R_1 - E_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt};$$

$$U_2 = I_2 R_2 - E_2 = I_2 R_2 + N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

де I_1 і I_2 - сили струму в первинній і вторинній обмотках; R_1 і R_2 - опори цих обмоток. N_1 і N_2 - число витків у первинній та вторинній обмотках трансформатора.

Якщо в обмотках при незмінному навантаженні встановлюється певний струм (в кожній своїй), то такий режим роботи трансформатора, що встановився, називається *робочим ходом*.

Якщо трансформатор ненавантажений то $I_2 = 0$. Такий режим роботи трансформатора називається *холостим ходом*.

Трансформатори за призначенням поділяють на кілька типів: *силові*, які застосовують при передаванні і розподіленні електроенергії для живлення силового та освітлювального навантаження; *вимірювальні* – для живлення електровимірювальних приладів; *спеціальні*, до яких належать зварювальні й випробувальні трансформатори, а також трансформатори для рентгенівських апаратів.

У лабораторних практикумах широкого застосування набули *автотрансформатори* (ЛАТР). Це трансформатори, в яких наявною є лише одна обмотка. Роль вторинної обмотки тут відіграє частина первинної обмотки або, навпаки, частина вторинної обмотки відіграє роль первинної.

У наш час рівень споживання енергії – основний показник розвитку продуктивних сил суспільства. Все більше процесів, пов'язаних з витратою енергоресурсів, переводиться на електроенергію. Велика частина електроенергії, яку використовують, перетворюється в механічну енергію.

Споживачами є: промисловість, транспорт, виробничі та побутові проблеми суспільства тощо.

Електроенергія виробляється на великих і малих електричних станціях в основному за допомогою індукційних генераторів. Є три типи електростанцій: *гідроелектричні (ГЕС)*, *теплові (ТЕС)*, *атомні (АЕС)*. Ці електростанції відрізняються характером двигунів, що обертають ротори генераторів.

На *гідроелектростанціях* (ГЕС) для приведення в дію генераторів використовується потенціальна енергія води, піднятої греблею. Ротори електричних генераторів обертаються гідравлічними турбінами. Потужність станції залежить від різниці рівнів води (напору), що створюється греблею, і від маси води, яка проходить через турбіни за секунду (витрати води).

На *теплових електростанціях* (ТЕС) джерелом енергії є паливо: вугілля, торф, нафта, мазут, горючі сланці, газ. Ротори електричних генераторів обертаються паровими й газовими турбінами або двигунами внутрішнього згорання. Найбільш економічними є великі теплові

паротурбінні електростанції.

У турбіні кінетична енергія струменів пари передається ротору. Вал турбіни жорстко з'єднаний з валом генератора. Парові турбогенератори досить швидкохідні: кількість обертів дорівнює кільком тисячам за хвилину.

Велике значення в електроенергетиці мають *атомні електростанції* (АЕС), які мають великі потужності. Джерелом енергії таких електростанцій є атом.

В основі дії атомних електростанцій лежить перетворення енергії, вивільненої від поділу ядер радіоактивних ізотопів, в електроенергію. Основними конструктивними елементами АЕС є ядерний реактор, що складається з активної зони, де власне відбувається ядерна реакція, парогенератор, турбіна, електричний генератор.

У перспективі мають мати місце атомні, вітряні, сонячні електростанції – джерелом енергії відповідно яких є атом, вітер, сонце.

Слід відзначити, що альтернативні відновлювальні джерела енергії, незважаючи на свою привабливість, не в змозі забезпечити всі енергетичні потреби сучасної економіки.

Струмам високої частоти властивий *поверхневий ефект* або *скін-ефект*. *Поверхневий ефект*: струм високої частоти протікає тільки по поверхні провідника. При струмі високої частоти біля провідника індукується електричне поле, яке напрямлене у сторону, протилежну основному полю та послаблює струм до нуля.

Занулення – це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним проводом металевих струмонепровідних частин, які можуть опинитися під напругою (корпуси електроустаткування, кабельні конструкції, сталеві труби тощо).

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ

Коливання – це вид руху, при якому система через рівні проміжки, або приблизно рівні проміжки, часу проходить через один і той же стан.

Періодичні або майже періодичні зміни заряду, сили струму і напруги називають *електричними коливаннями*.

Електромагнітні коливання – це коливання електричного заряду, сили струму, напруги, зв'язані з ним коливання напруженості електричного поля та індукції магнітного поля, а також самостійні коливання \vec{E} і \vec{B} в електромагнітній хвилі. Інакше: процес багатократного взаємного перетворення електричного і магнітного полів називається *електромагнітними коливаннями*.

Ці коливання відбуваються з дуже великою частотою, значно більшою від частоти механічних коливань, то їх називають ще *високочастотними* (від тисяч до мільйонів герц). Найзручнішим приладом для їх

спостереження і дослідження є *електронний осцилограф*.

Електронний осцилограф служить для спостереження з допомогою електронно-променевої трубки графіків змінного струму. Електронний осцилограф є незамінним при різномірних вимірюваннях (особливо в схемах телевізійних приймачів) як прилад, що дозволяє візуально контролювати форму різномірних сигналів, наявність наводок, викривлень і т.д.

Осцилограф у своїй будові має: електронно-променеву трубку; високовольтний випрямляч для подачі напруги на її електроди; підсилювач з регулюванням підсилення вимірюваних напруг.

Коливання виникаючи в контурі при відсутності зовнішнього джерела змінної електрорушійної сили, називаються *власними* або *вільними коливаннями*. Ці коливання називають ще *затухаючими*.

Рівняння вільних електромагнітних коливань:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0; \quad q'' + \omega_0^2 q = 0,$$

де $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - власна циклічна частота.

Дане рівняння являє собою однорідні диференціальні рівняння другого порядку, які називаються *диференціальними рівняннями вільних електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі*. Відповідно, *вільні електромагнітні коливання в ідеальному коливальному контурі також будуть гармонічними*.

Розв'язком даного рівняння є

$$q = A \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Вимушені електричні коливання – це коливання, які необхідно підтримувати ззовні в коливальному контурі за допомогою енергії, яка компенсує втрати на виділення тепла та на випромінювання електромагнітних хвиль.

Диференціальне рівняння реальних (тобто затухаючих) коливань

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0.$$

Розв'язком рівняння буде

$$q = A e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Коло, яке складається з конденсатора і котушки індуктивності називається *коливальним контуром*, саме в цій системі збуджуються електричні коливання. Це є ідеалізований коливальний контур так як в ньому активний опір дорівнює нулю.

Диференційне рівняння коливального контуру:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{CL} q = 0.$$

Розв'язком цього рівняння є:

$$q = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де ω - власна циклічна частота коливної системи, $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Для зміни параметрів коливального контуру використовують конденсатори змінної ємності, або котушки з змінною індуктивністю, які називаються *варіометрами*.

Коливальна система, яка сама керує зовнішніми впливами, називається *автоколивальною*, а виконуючі нею коливання *автоколиваннями*. Інакше: система, автоматично керуюча надходженнями енергії в неї для підтримки коливань з частотою, що дорівнює власній частоті коливань, називається *автоколивальною*.

Для автоколивальної системи:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega^2 q = \frac{\xi_0}{L} \cos \omega t,$$

де $\frac{\xi_0}{L}$ - амплітуда зовнішнього джерела.

Частинний розв'язок

$$q = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де A - амплітуда коливань; φ - зсув фаз між змінами заряду і зовнішньої ЕРС.

Формула для амплітуди та резонансної частоти

$$A = \frac{\xi_0}{\sqrt{\omega^2 R^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2 L^2}}, \quad \omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{R^2}{2L^2}},$$

де $2\beta = \frac{R}{L}$ - коефіцієнт затухання,

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

При досягненні резонансної частоти, яка обраховується за даним рівнянням, амплітуда коливань досягає максимуму - спостерігається *явище резонансу*.

Генератор незатухаючих коливань використовують для збудження і підтримки незатухаючих електричних коливань, тобто створення автоколивань. У ньому енергія джерела струму порціями передається контуру за допомогою тріода або транзистора. Найпростішими електричними автоколивальними системами є лампові або напівпровідникові генератори з зворотнім зв'язком.

У коло анода ввімкнений LC -контур, в якому і збуджуються автоколивання. В коло сітки ввімкнено котушку зв'язку L_z індуктивно зв'язану з котушкою коливального контуру. Її називають котушкою зворотного зв'язку. При наявності такої котушки струм у коливальному

контурі може індуктивно впливати на потік електронів чи, то в лампі або в транзисторі.

Конденсатор в колі сітки і бази служить для пропускання змінної складової і відділення постійного потенціалу від джерела живлення. Опір в колі сітки і бази служить для витоку лишніх електронів.

Коливання високої частоти дістають за допомогою *лампових генераторів*, названих так через те, що однією з частин є триелектродна лампа тріод. *Ламповий генератор* – це автоколивальна система, в якій виробляються незатухаючі коливання за рахунок енергії джерела постійної напруги, що входить до складу генератора, наприклад батареї гальванічних елементів або акумулятора.

Ламповий генератор має коливальний контур, який складається з котушки з індуктивністю L і конденсатора ємністю C . Електронна лампа тріод з одного боку, саме служить джерелом електронів, а з іншого боку «ключем» для своєчасної подачі їх на пластини конденсатора.

Лампові генератори використовувалися на всіх передавальних радіостанціях, а також входили до складу багатьох інших радіотехнічних пристроїв.

В напівпровідниковому генераторі електромагнітних коливань джерелом електронів є звичайне хімічне джерело, а от керованим ключем є транзистор.

Відповідність механічних і електричних величин в коливальних процесах

Механічні величини	Електричні величини
Координата x	Заряд q
Швидкість v	Сила струму I
Маса m	Індуктивність L
Жорсткість пружини k	Величина, обернена ємності $\frac{1}{C}$
Потенціальна енергія $\frac{kx^2}{2}$	Енергія електричного поля $\frac{q^2}{2C}$
Кінетична енергія $\frac{mv^2}{2}$	Енергія магнітного поля $\frac{LI^2}{2}$

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

1. *Електромагнітні хвилі* – це поширення в просторі вільного електромагнітного поля.

2. *Електромагнітна хвиля* – збурення електромагнітного поля, яке поширюється в просторі з певною швидкістю і може існувати без джерела живлення.

3. *Електромагнітна хвиля* – збурення електромагнітного поля, яке поширюється в просторі з кінцевою швидкістю.

Електромагнітні хвилі випромінюються електричними зарядами, що рухаються з прискоренням. Наявність прискорення – основна умова випромінювання електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі – це *поперечні хвилі*.

Змінне в просторі і в часі магнітне поле безперервно породжує в навколишніх областях простору вихрове електричне поле, яке в свою чергу породжує в сусідніх областях простору вихрове магнітне поле і т.д.

1. Електромагнітні хвилі поширюються в просторі зі швидкістю, що дорівнює швидкості світла.

2. Джерелом електромагнітних хвиль є електричні заряди, що рухаються з прискоренням, а також змінні магнітні електричні і магнітні поля.

3. Енергія електромагнітної хвилі пропорційна четвертій степені частоти коливань ν у хвилі.

Щоб добути інтенсивні електромагнітні хвилі, треба утворити електромагнітні коливання досить високої частоти. Для цього Г. Герц скористався пристроєм, який тепер називається *вібратором Герца*. Цей пристрій є *відкритим коливальним контуром*. Тобто, для випрямлення електромагнітних хвиль потрібно створити електромагнітні коливання високої частоти у відкритому коливальному контурі.

В закритому коливальному контурі електромагнітні коливання зосереджені в конденсаторі і котушці, то в вібраторі Герца вони розташовані навколо нього і можуть випромінюватися в навколишній простір.

Закритий коливальний контур – це контур, в якому його електричне поле зосереджене між обкладками конденсатора, а магнітне – в котушці. Тому такий коливальний контур випромінювати в простір електромагнітні хвилі не може.

Частота електромагнітних хвиль, що випромінюється вібратором:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}; \nu = \frac{c}{2l} \text{ і } T = \frac{2l}{c},$$

де $\lambda = 2l$ - довжина хвилі, що випромінюється вібратором; l - довжина самого вібратора; ν - частота; T - період коливань; c - швидкість хвилі.

Герц не тільки добув електромагнітні хвилі, а й виявив, що вони поведуться подібно до інших хвиль. Зокрема, він спостерігав відбивання електромагнітних хвиль від металевого листа й інтерференцію хвиль.

Рівняння одновимірної хвилі

$$q = A \sin(\omega t - kx + \varphi_0),$$

де A - амплітуда; $t = \frac{x}{v}$ - час проходження хвилею збурення електростатичного поля шляху x ; v - швидкість, $vT = \lambda$, λ - довжина хвилі – віддаль між двома точками, які коливаються в однаковій фазі; $\frac{2\pi}{\lambda} = k$ - хвильовий вектор - напрям, якого співпадає з напрямом поширення хвилі і дорівнює хвильовому числу, тобто скільки довжин хвиль вкладається в відрізок 2π ; $\omega t - kx + \varphi_0 = \Phi$ - фаза хвилі; $x = \frac{\omega t + \varphi_0 - \Phi}{k}$.

Поверхня хвилі з однаковою фазою називається *фронтом хвилі* або *хвильовою поверхнею*.

Фронт хвилі – це поверхня, на якій основні параметри (E, H, φ, W_E, W_H) електромагнітного поля однакові. Або інша трактовка: *фронтом хвилі* називається передній рівень хвилі, що безпосередньо межує з незбуреним середовищем.

Швидкість фронту хвилі

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi v}{k} = \frac{2\pi}{Tk} = \frac{\lambda}{T}.$$

Швидкість поширення в просторі сталої фази (фронту хвилі) називають *фазовою швидкістю електромагнітної хвилі*.

Рівняння тривимірної хвилі

$$q = \frac{A_0}{r} \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0),$$

де $r = f(x, y, z)$; $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

Основні характеристики електромагнітної хвилі

1. Швидкість поширення хвилі (v).
2. Довжина хвилі (λ) - віддаль між двома максимумами або мінімумами збурення електромагнітного поля.
3. Густина потоку випромінювання (інтенсивність) (I).
4. Об'ємна густина енергії електромагнітної хвилі (w).

Коливальні заряди випромінюють електромагнітні хвилі. При цьому істотне значення має те, що швидкість руху таких зарядів змінюється з часом, тобто вони рухаються з *прискоренням*. *Наявність прискорення* – *головна умова випромінювання електромагнітних хвиль*.

Сили взаємодії з допомогою електромагнітного поля залежать не тільки від відстані між зарядженими частинками і їх швидкостей, а й від прискорень.

Модулі векторів \vec{E} і \vec{B} в електромагнітній хвилі зменшуються обернено пропорційно відстані в першому степені.

Почавши з відтворення дослідів Герца, Попов потім знайшов

надійніший і чутливіший спосіб реєстрації електромагнітних хвиль.

Як деталь, що безпосередньо «відчуває» електромагнітні хвилі, О.С. Попов використав *когерер*. Це скляна трубка з двома електродами. У трубці містяться дрібні металеві ошурки. Дія приладу ґрунтується на впливі електричних розрядів на металеві порошки, що його відкрив французький фізик Бранлі.

Пізніше Попов збільшив чутливість апарата. Він заземлив один з виводів когерера, а другий приєднав до високо піднятого куска дроту, створивши першу *приймальну антену*.

Радіозв'язок пов'язаний з поширенням *радіохвиль*. *Радіохвилями* називають електромагнітні хвилі, що зумовлюють радіозв'язок. Радіохвилі – це електромагнітні хвилі високої (несучої) частоти, модульовані за звуковим (радіо) або світловим (телебачення) сигналом. Радіохвилі поширюються через: *випромінювання; приймання*.

Поширення радіохвиль розглядає *радіофізика* – розділ фізики, який вивчає фізичні процеси, що відбуваються в елементах і системах радіоелектроніки (коливання і хвилі в електричних колах; електричні процеси у вакуумі, газах, твердих тілах тощо).

Модуляція – зміна параметрів несучої хвилі. *Амплітудна модуляція* – це зміна амплітуди коливань несучої частоти з частотою низьких коливань (звукової частоти); здійснюється в передаючому пристрої. Без модуляції ми можемо лише константувати, працює станція чи ні, а також без модуляції немає ніякого передавання.

Колівання високої частоти з накладеною на них звуковою частотою називаються *модульованими коливаннями*.

Модуляція повільний процес. Це такі зміни у високочастотній коливальній системі, при яких вона встигає зробити дуже багато високочастотних коливань, перш ніж помітно зміниться їх амплітуда. Амплітудна модуляція – це не єдиний спосіб передачі інформації.

Можливі й інші види модуляції. Висока частота переносить на собі звукову, що несе інформацію, при цьому вона називається *несучою*, а звукова частота, що переноситься – *частотною модуляцією*. Або іншими словами: процес плавної зміни частоти коливання відповідно до керуючого сигналу називається *частотною модуляцією*, а зміни фази – *модуляцією за фазою*. Модуляція з однією частотою називається *однотональною*. Це складніші способи модуляції.

Детектування – це процес, при якому у приймачі з модульованих коливань високої частоти виділяють низькочастотні коливання. Детектування – процес, обернений модуляції (демодуляція); здійснюється в прийомному пристрої.

Добутий внаслідок детектування сигнал відповідає тому звуковому сигналу, який діяв на мікрофон передавача.

Рівняння Максвелла говорять про те, що електромагнітні коливання можуть не тільки виникати поблизу від джерела, але і поширюватися в просторі в вигляді електромагнітних хвиль. Енергія цих хвиль також зменшується з віддалю.

Передачі ведуться *на несучій хвилі*.

Перед тим, як здійснювати радіозв'язок потрібно низькочастотні коливання звукових частот (16–20000 Гц) скласти з електромагнітними коливаннями високих частот (15000–20000000 Гц, тобто від 20 МГц до 15 кГц).

Для того, щоб приймати електромагнітні коливання потрібно:

1. *Відкритий коливальний контур*, пов'язаний індуктивно з закритим коливальним контуром із змінним конденсатором.

2. *Настроїти приймач на певну радіостанцію* в закритому коливальному контурі приймача виникнуть високочастотні модульовані коливання. По цій причині на динамік приймача подається уже відділений від «канви» чистий «узор». «Узор» «вирізається» з допомогою *детектора*, тобто звичайного опору (електронна лампа, напівпровідниковий діод), але який не підлягає закону Ома. В результаті *детектування* вдається отримати узор без канви. Чутлива мембрана навушників буде відтворювати звукові коливання.

Детектування здійснює пристрій, що має елемент з односторонньою провідністю – *детектор*. Таким елементом може бути електронна лампа (вакуумний діод, тріод) або напівпровідниковий діод. У загальному випадку детектором може бути елемент з будь-якою нелінійною вольт-амперною характеристикою.

Схема детекторного приймача має три блоки:

1. *Блок настройки* - сюди входить відкритий і зв'язаний з ним закритий коливальний контур, який призначений для відшукування резонансу власної частоти з частотою радіостанції, яка є джерелом випромінювання.

2. *Гетеродин* - саме в цьому блокові відбувається виділення узору від канви з модульованого сигналу отриманого після першого блоку.

3. *Низькочастотний блок* - він призначений перетворювати коливання електричних сигналів звукових частот в коливання дифузора динаміка.

Внутрішній генератор незатухаючих коливань називають *гетеродином*.

Частота гетеродина

$$\Delta\omega = \omega_r - \omega_0,$$

де ω_r - частота внутрішнього генератора (гетеродина); ω_0 - частота несучої хвилі.

До основних характеристик сучасних приймачів відносяться:

Чутливість – здатність приймача приймати слабкі сигнали віддалених станцій - характеризує роботу підсилювачів.

Вибірковість – дозволяє легко відстроюватись від сусідніх станцій, тобто підсилити сигнал одної конкретної станції і подавити сигнали всіх інших станцій, працюючих на близьких частотах - характеризує, як якість виготовлення блоку настройки так і узгодженість зворотних зв'язків.

Полоса пропускання – для доброго відтворення полоса пропускання повинна бути рівна ширині полоси частот, яку випромінює радіостанція.

Стійкість приймання – здатність радіоприймача довгий час зберігати настройку на станцію і встановлену гучність. Має велике значення при прийомі короткохвильового діапазону.

Якість звучання – характеризується ступеню відтворення звуків до дійсних. Залежить головним чином від кількості спотворень (6%), які вносить радіоприймач в передачу, ширини пропускнуої полоси частоті рівня спотворень.

Від якості основних параметрів сучасні приймачі діляться на 5 класів: високий, I, II, III, IV.

До високого класу – відносяться приймачі, в яких досягнуті високі основні параметри, мають широкополосні акустичні системи, насичені різними сервісними пристроями;

I клас – майже не посуваються вищому класу за параметрами, але мають менше сервісних пристроїв;

II клас – добротні приймачі, які найбільш поширені;

III – IV класи – масові моделі невеликих розмірів на 2 – 3 діапазони. Розраховані на приймання місцевих радіостанцій, якість звучання невисока, яка виконується одним гучномовцем.

Накладання електромагнітних хвиль називається *модуляцією*.

Властивості електромагнітних хвиль:

- 1) добре *відбиваються* від металів;
- 2) *поглинаються* в різних діелектричних тілах;
- 3) *заломлюються* на межі діелектриків;
- 4) *інтерферують* при додаванні;
- 5) подібно до механічних хвиль, електромагнітні хвилі огинають перешкоди, тобто їм властива *дифракція*;

5) *дисперсія* електромагнітних хвиль. (*Дисперсія* – хвиль – це залежність швидкості хвилі від її частоти в неоднорідних середовищах (в однорідних середовищах і, частково, у вакуумі дисперсія не спостерігається));

6) також кожний із векторів \vec{E} і \vec{B} розміщені у певній площині, що говорить про їх *поляризованість*. (*Поляризація* – це явище виділення із складної електромагнітної хвилі таких хвиль, у яких вектор електричної напруженості (або магнітної індукції) коливаються тільки в одній площині.

Такі виділення хвилі називаються *лінійно* або *плоскополяризованими*. Поляризація зумовлена попередністю електромагнітних хвиль);

7) *поперечність* електромагнітних хвиль, тобто, це означає, що вектори \vec{E} і \vec{B} електромагнітного поля хвилі перпендикулярні до напрямку її поширення.

Електромагнітні хвилі сантиметрового діапазону добре поширюються в провідній трубці прямокутного перерізу – у *хвилеводі*. У кінці труба розширюється, утворюючи рупор, який випромінює радіохвилі в певному напрямі.

На поширення радіохвиль істотно впливають шари іонізованого газу у верхніх шарах атмосфери на висоті 100-300 км над поверхнею Землі. Ці шари називають *іоносферою*. Ще одна властивість радіохвиль та, що вони здатні *огинати* опуклу земну поверхню. Поширення радіохвиль залежить від їх довжини.

Шкала електромагнітних хвиль

1. *Низькочастотні коливання*. Джерелом такого роду коливань є механічні вібратори (електродвигуни, генератори, різного роду розрядники, а також електромережа, частота, якої 50 Гц).

2. *Радіодіапазон*. Джерелом такого роду коливань є LC-генератори, тобто пристрої в основі, яких є коливальний контур. Радіодіапазон ділиться на наступні піддіапазони.

ДХ – *довгі хвилі* зазнають відчутної дифракції біля земної поверхні і притягуються до Землі наведеними ними індукційними струмами в земній корі; поширюються далеко за горизонт

наддовгі від 10 до 100 км

довгі від 1 до 10 км

СХ – *середні хвилі* обумовлюють стійкий радіозв'язок між віддаленими пунктами на земній поверхні поза межами прямої видимості завдяки відбиванню радіохвиль від іоносфери і здатності радіохвиль огинати опуклу земну поверхню. Саме тому радіозв'язок в діапазоні середніх хвиль є найбільш надійним вночі та взимку.

від 100 до 1000 м

КХ – *короткі хвилі* поширюються прямолінійно від випромінюючої антени (зазнаючи незначної дифракції) і, відбиваючись від іоносфери Землі, повертаються до її поверхні; поширюються далеко за горизонт.

від 10 до 100 м

УКХ – *ультракороткі хвилі* пронизують іоносферу (космічний зв'язок), а також розповсюджуються вздовж Землі, у зоні прямої видимості (УКХ радіостанція, телебачення, мобільний телефон).

метрові від 1 до 10 м

дециметрові від 10 до 100 см

сантиметрові від 1 до 10 см

міліметрові від 1 до 10 мм
субміліметрові від 0,1 до 1 мм

3. *Оптичний діапазон*. Джерелом такої довжини електромагнітних хвиль є перехід електронів в атомі з вищого рівня на нижчий.

Лаймана - ультрафіолетовий діапазон (утворення пігментного шару (загару)); *Бальмера* - видиме світло; *Пашена*; *Брекетта* - інфрачервоний діапазон (хвилі тепла); *Пфунта*.

4. *Рентгенівське випромінювання* – дуже часто відносять до оптичного діапазону. Джерелом такого роду електромагнітних хвиль є рентгенівські трубки.

5. *γ - випромінювання*. Джерелом такого випромінювання є ядерні реакції.

У сучасній техніці явище відбивання радіохвиль різними перешкодами знайшло широке застосування. Виявлення і точне місцезнаходження об'єктів за допомогою радіохвиль називають *радіолокацією*. У радіолокації використовують електричні коливання надвисокої частоти ($10^8 - 10^{11}$ Гц). Радіолокаційна установка, яка працює на цій частоті - *радіолокатор (радар)*.

Високочутливий приймач, що уловлює і підсилює відбитий сигнал, за яким визначають, де знаходиться той предмет, від якого відбилася хвиля називається *радіолокатором*. Він складається з передавальної і приймальної частини. Відстань визначають вимірюванням загального часу проходження радіохвиль до об'єкта і назад.

$$R = \frac{ct}{2},$$

де t - час проходження радіохвиль; $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - швидкість радіохвиль.

Радіолокатори використовують для виявлення літаків і кораблів, у службі погоди, для локації планет і ін.

Радіолокатор (радар) є важливою частиною *радіолокаційних станцій* (РЛС). Основними частинами радіолокаційних станцій є *радіопередатчик*, *радіоприймач* і *антенна система*.

Основною частиною приймача РЛС є *електронний осцилограф*, на горизонтально відхиляючі обкладки якого подається напруга розгортки, а на вертикально відхиляючі поступає сигнал в момент випромінювання радіохвилі і в момент її прийому.

Час проходження сигналу до цілі і назад $t_{\text{заг}}$ є величина, обернена частоті випромінювання імпульсів $\nu_{\text{имп}}$:

$$t_{\text{заг}} = \frac{1}{\nu_{\text{імп}}}.$$

Кожний імпульс має $N_{\text{кол}}$ коливань вектора напруженості електричного поля \vec{E} в електромагнітній хвилі. Число коливань $N_{\text{кол}}$ можна визначити, якщо поділити час випуску імпульсу τ на період одного коливання $T_{\text{кол}}$:

$$N_{\text{кол}} = \frac{\tau}{T_{\text{кол}}}, \text{ або } N_{\text{кол}} = \tau \nu_{\text{кол}}.$$

Радіохвилі використовують не тільки для передавання звуку, а й для передавання зображення (телебачення). *Телебаченням* називається метод передачі на відстань зображень рухомих і нерухомих об'єктів під впливом електромагнітних хвиль.

У нашій країні створюється єдина автоматизована система зв'язку. З цією метою безперервно розвиваються, удосконалюються й знаходять нові галузі застосування різні технічні засоби зв'язку (телефонний, телефонно-телеграфний, телеграф, фототелеграф, телебачення, радіотелефонний, Інтернет).

2.2. Фізичні величини та одиниці їх вимірювання

ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Електричний заряд є скалярна фізична величина, що визначає інтенсивність електромагнітної взаємодії. Одиниця заряду в СІ – *кулон*: $[Кл]$.

1 *Кулон* – це заряд, що протікає через поперечний переріз провідника протягом 1 с при силі постійного струму в 1 А $[1 Кл = 1 А \cdot с]$.

Електричний заряд – адитивна величина. Це означає, що загальний заряд q системи, що складається із N заряджених частинок, дорівнює сумі зарядів частинок, що входять в цю систему, тобто

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_N;$$

$$q = \sum_{i=1}^N q_i.$$

Лінійна густина заряду τ , рівномірно розподіленого по нитці, дорівнює відношенню заряду нитки q до його довжини l :

$$\tau = \frac{q}{l}.$$

Лінійна густина – скалярна величина. Одиниця лінійної густини заряду

в СІ – кулон на метр: $\left[\frac{\text{Кл}}{\text{м}} \right] \cdot 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}}$ - лінійна густина заряду, при якій на кожному метри нитки міститься заряд 1 Кл.

Поверхнева густина σ заряду дорівнює відношенню заряду q , рівномірно розподіленого по поверхні, до площі S цієї поверхні:

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

Поверхнева густина – скалярна величина. Одиниця поверхневої густини заряду в СІ – кулон на квадратний метр: $\left[\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right] \cdot 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$ - це поверхнева густина заряду, при якій на кожному квадратному метрі площі поверхні знаходиться заряд 1 Кл.

Об'ємна густина заряду ρ , рівномірно розподіленого в об'ємі V , дорівнює відношенню заряду до об'єму, по якому він розподілений:

$$\rho = \frac{q}{V}.$$

Об'ємна густина – скалярна величина. Одиниця об'ємної густини заряду в СІ – кулон на метр кубічний $\left[\frac{\text{Кл}}{\text{м}^3} \right] \cdot 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3}$ - це об'ємна густина заряду, при якій в кожному кубічному метрі зарядженого тіла утримується заряд 1 Кл.

Силовою характеристикою електричного поля є фізична величина, яка називається *напруженістю*. Це векторна величина, що дорівнює відношенню сили, з якою поле діє на пробний заряд, до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0},$$

де \vec{F} – сила, що діє з боку поля на пробне заряджене тіло.

Напруженість електричного поля в даній точці дорівнює силі, діючій на одиничний пробний заряд, внесений в цю точку поля.

Одиниця напруженості електричного поля *ньютон на кулон*: $\left[\frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ Кл}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right] \cdot 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ - напруженість електричного поля в такій точці, в якій на пробний заряд 1 Кл діє сила 1 Н.

Сила, з якою діє електростатичне поле називається *кулонівською силою*:

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Коли на заряд внесений у поле буде діяти сила, то

$$E = k \frac{|q|}{\epsilon r^2}.$$

Або:

$$E = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}.$$

Напруженість є силова, векторна характеристика поля.

Величина вектора напруженості залежить від властивостей середовища. Тому на межі двох середовищ напруженість електричного поля і густина ліній напруженості, а також загальна кількість ліній стрибкоподібно змінюються. Це зумовлює незручності й ускладнення в розрахунках електричних полів і їх графічному зображенні. Зручною для характеристики електричного поля була б величина, яка не залежала б від діелектричних властивостей середовища, а отже, не змінювалася б з переходом з одного середовища в інше. Такою величиною є

$$\vec{D} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}.$$

Вектор \vec{D} називають *вектором електричної індукції*, або *вектором електричного зміщення*.

Вектор електричного зміщення має одиницю *кулон на метр квадратний*: $\left[1 \frac{\text{Кл}^2}{\text{Нм}^2} \cdot 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}\right]$.

Електростатичне поле рівномірно зарядженої *нескінченної площини* визначається виразом:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}; D = \frac{\sigma}{2}.$$

де σ - поверхнева густина електричного заряду ($\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$).

Поле нескінченної рівномірно зарядженої площини є однорідним.

Електростатичне поле біля поверхні зарядженого провідника:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}; D = \sigma.$$

Електростатичне поле між двома різнойменно зарядженими паралельними нескінченними площинами:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}; D = D_1 + D_2 = \sigma.$$

Поле таких площин однорідне і цілком зосереджене між ними.

Електричне поле рівномірно зарядженої сферичної поверхні:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}; D = \frac{q}{4\pi r^2}.$$

Електростатичне поле нескінченно довгого прямого рівномірно

зарядженого циліндра:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}; D = \frac{\tau}{2\pi r}.$$

де τ - лінійна густина заряду довгого циліндра $\left(\tau = \frac{\Delta q}{\Delta l}\right)$.

Потоком вектора напруженості Φ_E через площину називають скалярну величину, що дорівнює добутку модуля вектора напруженості і величини цієї площини:

$$\Phi_E = ES; \text{ або } \Phi_E = E_n S,$$

де E_n - вектор нормалі електричної напруженості, причому $E_n = E \cos \alpha$; α - кут між лініями вектора \vec{E} і нормаллю n до площини S .

$$\Phi_E = ES \cos \alpha.$$

Потік вектора напруженості електричного поля скрізь деяку площину дорівнює добутку модуля напруженості на величину площини і на косинус кута між вектором напруженості і нормаллю до цієї площини.

$$\Phi_E = DS = N_E,$$

де N_E - число ліній вектора індукції через площину.

Потік вектора напруженості електричного поля чисельно дорівнює кількості ліній вектора напруженості через площину, яку ці лінії перетинають.

Одиниця потоку вектора напруженості в СІ – ньютон-квадратний метр на кулон: $\left[\frac{H \cdot m^2}{Kл}\right]$.

Потік вектора напруженості крізь замкнуту поверхню, що не містить зарядів, дорівнює нулю.

Величина $\Delta\Phi_D$ називається потоком вектора електричної індукції через площу ΔS у нормальному напрямі. Потік вектора електричної індукції вимірюється кількістю ліній індукції, які пронизують у нормальному напрямі площину ΔS . Це величина скалярна.

$$\Delta\Phi_D = D\Delta S;$$

$$\Phi_D = DS;$$

$$\Phi_D = D_n S,$$

де D_n - вектор нормалі електричної індукції, причому $D_n = D \cos \alpha$; α - кут між лініями вектора \vec{D} і нормаллю n до площини S .

$$\Phi_D = DS \cos \alpha.$$

Потік вектора індукції електричного поля скрізь деяку площину дорівнює добутку модуля індукції на величину площини і на косинус кута між вектором індукції і нормаллю до цієї площини.

$$\Phi_D = DS = N_D,$$

де N_D - число ліній вектора індукції через площину.

Потік вектора індукції електричного поля чисельно дорівнює кількості ліній вектора індукції електричного поля через площину, яку ці лінії перетинають.

Одиниця потоку вектора електричної індукції – кулон:

$$\left[1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Кл} \right].$$

Потік вектора індукції крізь замкнуту поверхню, що не містить зарядів, дорівнює нулю.

Робота переміщення заряду, що виконується силами Кулона в однорідному електростатичному полі, дорівнює добутку цього заряду, напруженості поля і проекції вектора переміщення на силову лінію.

$$A = qEd$$

На відрізку шляху $\Delta d = d_1 - d_2$ електричне поле виконує додатну роботу

$$A = qE(d_1 - d_2),$$

де $d_2 < d_1$ - відстані.

Робота в електростатичному полі: не залежить від шляху, а визначається координатами точок, між якими переноситься заряд; у будь-якому замкнутому контурі дорівнює нулю.

Формула, що визначає роботу переміщення точкового заряду в полі точкового та зарядженої кулі:

$$A = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r^2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

де r - відстань до заряду джерела; r_1 - відстань між пробним зарядом і зарядом-джерелом; r_2 - відстань між зарядом-джерелом і полем точкового заряду.

Робота, що виділяється на переміщення заряду q в електростатичному полі:

$$A = qU.$$

Потенціальними називають поля, в яких робота при переміщенні зарядженого тіла з однієї точки в іншу не залежить від форми траєкторії та на замкнутій траєкторії вона дорівнює нулю.

Сили, робота яких на замкнутій траєкторії дорівнює нулю і не залежить від форми траєкторії, називають *консервативними силами*. Відповідно, електростатичні сили є *консервативними силами*.

Іншими словами: силове поле, в якому на тіло діють консервативні сили, називається *потенціальним полем*. Відповідно, електростатичне поле

– поле потенціальне.

Потенціальну енергію заряджених тіл називають *електричною*, або *кулонівською*.

Якщо робота не залежить від форми траєкторії руху тіл, то вона дорівнює зміні потенціальної енергії тіла, взятої з протилежним знаком:

$$A = -\Delta W_p,$$

де $W_p = qEd$ - потенціальна енергія заряду в однорідному електричному полі на відстані d від пластини.

Оскільки заряд q може бути як позитивним так і негативним, то при $q < 0$ - потенціальна енергія буде від'ємна.

Якщо поле виконує додатну роботу, то потенціальна енергія зарядженого тіла в полі зменшується: $\Delta W_p < 0$, а якщо робота від'ємна, то $\Delta W_p > 0$.

Потенціальна енергія дорівнює нулю на поверхні:

$$W_p = qEd - qEd_2,$$

тобто можна вважати, що $W_p = 0$ на відстані d_2 .

Фізичний зміст має не сама потенціальна енергія, а її різниця значень, яка визначається роботою поля при переміщенні заряду від початкового положення в кінцеве.

Потенціальна енергія взаємодії двох зарядів q_1 та q_2 :

$$W_p = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r}.$$

Потенціальна енергія заряду q_0 в однорідному електричному полі:

$$W_p = q_0 \varphi.$$

Оскільки робота з переміщення заряду в електростатичному полі не залежить від форми шляху і визначається лише положенням крайніх точок (початкової та кінцевої), то кожній з цих точок, крім силової характеристики \vec{E} , можна приписати ще й енергетичну характеристику φ , яку називають *потенціалом електростатичного поля*.

Потенціал електричного поля дорівнює відношенню потенціальної енергії заряду в цьому полі до величини цього заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0}.$$

Інакше, *потенціалом φ* в заданій точці електростатичного поля називається фізична величина, що чисельно дорівнює потенціальній енергії пробного точкового тіла з одиничним позитивним зарядом, вміщеним в дану точку поля.

Потенціалом електричного поля в заданій точці називається фізична

величина, що чисельно дорівнює роботі, яку виконують сили електричного поля при переміщенні пробного тіла з одиничним позитивним зарядом з заданої точки у нескінченність (або в точку поля, для якої умовно прийнято, що потенціал дорівнює нулю).

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q_0}.$$

Потенціал поля φ , створеного в даній точці множиною зарядів-джерел, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів φ_i , створених в цій точці кожним зарядом окремо (з врахуванням плюсів і мінусів):

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i.$$

Потенціал є скалярною, енергетичною характеристикою електричного поля. Одиницею потенціалу є *вольт*: $\left[1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В} \right]$.

Вольт – це різниця потенціалів між двома точками, що дорівнює одиниці, якщо під час переміщення заряду 1 Кл з однієї точки в іншу електричне поле виконує роботу 1 Дж . Або 1 В це потенціал електричного поля в такій точці, при переміщенні із якої в нескінченність заряду 1 Кл виконується робота 1 Дж .

Потенціали всіх точок всередині провідника з нерухомими зарядами однакові, і дорівнюють потенціалу на його поверхні.

Різниця потенціалів є фізична величина, що визначається роботою при переміщенні одиничного пробного заряду q_0 між точками поля з потенціалами φ_1 і φ_2 :

$$\frac{A_{12}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2;$$

Величина

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

називається *різницею потенціалів* електричного поля між двома його точками.

Різницю потенціалів вимірюють за допомогою електрометра.

Різницю потенціалів називають ще *напругою* і позначають U :

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

Напруга між двома точками електричного поля дорівнює різниці потенціалів у цих точках і вимірюється роботою, яку виконують сили електростатичного поля, переміщуючи пробне тіло з одиничним зарядом з однієї точки поля в іншу. Вимірюють напругу в СІ у *вольтах*.

$$U = \frac{A_k + A_{cm.}}{q},$$

де A_k - робота кулонівських сил; A_{cm} - робота сторонніх сил.

Сторонні сили – це будь-які сили, крім кулонівських, які діють на заряд.

$$U = \frac{A}{q}.$$

Потенціал поля точкового заряду в даній точці поля прямо пропорційний модулю цього заряду, обернено пропорційний відстані від цієї точки до заряду і залежить від середовища, в якому знаходиться заряд.

Вираз для потенціалу поля точкового заряду та зарядженого сферичного тіла:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r},$$

де r - відстань від центра сфери до будь-якої точки поля, що розташована поза сферою.

Потенціал поля в точках на поверхні сфери з нерухомими зарядами або в будь-яких точках всередині сфери (сплошної або пустої), якщо всередині немає зарядів, визначає формула:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R},$$

де R - радіус сфери.

Потенціал нескінченно віддалених точок:

$$\varphi_1(r) = \frac{A}{q}.$$

Потенціал у даній точці електричного поля, що створюється системою зарядів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, які створюються кожним зарядом окремо:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$$

Напруженість у будь-якій точці електростатичного поля дорівнює зміні потенціалу, який припадає на одиницю довжини ліній напруженості поля:

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{l},$$

де l - довжина ліній напруженості.

Потенціал в даній точці поля точкового заряду дорівнює добутку напруженості поля в цій точці і відстані від даної точки до заряду.

$$\varphi = El,$$

або

$$\varphi = \int_1^{\infty} E \cdot \cos(E, dl) \cdot dl.$$

Зв'язок різниці потенціалів з напруженістю електричного поля:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}; E = \frac{U}{d}.$$

Напруженість однорідного електричного поля дорівнює відношенню різниці потенціалів (напруги) між двома його точками до проекції відрізка, що з'єднує ці точки, на лінію вектора напруженості.

Вектор напруженості поля завжди напрямлений у бік зменшення потенціалу.

Одиницю напруженості електричного поля в одиницях СІ встановлюють на основі одиниці різниці потенціалів – *вольт на метр* $\left[\frac{B}{m}\right]$.

Вольт на метр – це напруженість електричного поля дорівнює одиниці, якщо різниця між двома точками на відстані 1 м в однорідному полі дорівнює 1 В.

Діелектрична проникність середовища – це фізична величина, що показує, у скільки разів напруженість зовнішнього поля \vec{E}_0 більша від напруженості поля в діелектрику \vec{E} .

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Величина діелектричної проникності залежить від виду матеріалу середовища: $\varepsilon_{\text{води}} = 81$; $\varepsilon_{\text{парафіну}} = 2$; $\varepsilon_{\text{повітря}} = 1$.

Відношення величини заряду провідника до відповідного значення потенціалу – величина стала. Це відношення називається *електроємністю*, або просто *ємністю* провідника, і записується такою формулою:

$$C = \frac{q}{U},$$

$$\text{де } U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Напруга U між двома провідниками пропорційна електричному заряду, який знаходиться на провідниках (на одному $+|q|$, а на другому $-|q|$). Чим менша напруга при наданні провідникам зарядів $+|q|$ і $-|q|$, тим більша електроємність провідників.

$$C = \frac{q}{\varphi},$$

звідки

$$q = C\varphi.$$

Зміна величини заряду буде

$$\Delta q = C\Delta\varphi.$$

Фізичний зміст електроємності: *електрична ємність провідника чисельно дорівнює зарядові, який потрібний для зміни потенціалу провідника на одиницю.*

Електроємність – скалярна позитивна величина. Одиницею електричної ємності є: $\left[1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = 1 \text{ Ф} \right]$. *Фарад* – це електрична ємність двох таких провідників, між якими при наданні кожному з них зарядів $+1 \text{ Кл}$ і -1 Кл між ними виникає різниця потенціалів 1 В . Або 1 Ф – ємність провідника, потенціал якого змінюється на 1 В при надані йому заряду 1 Кл .

Електроємність залежить від геометричних розмірів і форми провідника, розташування навколо нього інших провідників, діелектричних властивостей середовища. Електроємність не залежить від матеріалу провідника і його агрегатного стану, наявності порожнин, величини заряду.

Ємність відокремленого провідника сферичної форми пропорційна відносній діелектричній проникності середовища, що охоплює провідник, і радіусу провідника:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R.$$

Електроємність конденсатора C дорівнює відношенню заряду q на одній із його обкладок до різниці потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2 = U$. Електроємність конденсаторів визначають за формулою

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}; C = \frac{q}{U}.$$

Тобто ємність конденсатора дорівнює заряду, який йому необхідно надати, щоб змінити різницю потенціалів між його обкладками на одиницю.

Формула електроємності для плоского конденсатора, який складається з двох пластин з діелектриком між ними:

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d},$$

де S - площа пластин; d - відстань між ними; ϵ_0 - електрична стала; ϵ - діелектрична проникність середовища між пластинами; $\epsilon = \frac{C}{C_0}$, C - ємність конденсатора з діелектричною пластинкою між обкладками, C_0 - ємність конденсатора без діелектричної пластинки між обкладками; $U = Ed$; $E = \frac{q}{\epsilon_0\epsilon S}$.

Отже, ємність плоского конденсатора прямо пропорційна відносній діелектричній проникності діелектрика між обкладками, площі обкладок конденсатора і обернено пропорційна відстані між обкладками.

Оскільки

$$\varepsilon_0 = \frac{Cd}{\mathcal{E}S},$$

при цьому одиницею електричної постійної, крім *кулон в квадраті наньютон-метр квадратний*: $\left[\frac{Кл^2}{Н \cdot м^2} \right]$, є також *фарад на метр*: $\left[\frac{\Phi}{м} \right]$.

Для того щоб зарядити конденсатор, потрібно виконати роботу, що витрачається на розділення позитивних і негативних зарядів. Згідно із законом збереження енергії ця робота дорівнює енергії, якої набуває конденсатор.

$$W_p = q \frac{E}{2} d,$$

де q - заряд конденсатора; а d - відстань між пластинами.

Оскільки $Ed = U$ - різниця потенціалів між обкладками конденсатора, то його енергія дорівнює:

$$W_p = \frac{qU}{2}.$$

Замінивши у формулі або різницю потенціалів, або заряд за допомогою виразу для електроємності конденсатора, дістанемо:

$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2},$$

де q, U, C - відповідно заряд, напруга (потенціал) і електроємність провідника.

Конденсатори з'єднують *паралельно, послідовно* або *мішано*.

Якщо конденсатори з'єднати так, щоб їх ліві обкладки були з'єднані в одній точці, а праві – в іншій, то таке з'єднання називається *паралельним*.

Якщо конденсатори з'єднати так, щоб одна обкладка попереднього конденсатора була з'єднана тільки з одною обкладкою наступного конденсатора, то таке з'єднання називається *послідовним*.

Якщо конденсатори одночасно з'єднати паралельно і послідовно, то таке з'єднання називається *мішаним*.

Паралельне з'єднання конденсаторів

Напруги на паралельно з'єднаних конденсаторах однакові:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_N = U.$$

Загальний заряд батареї паралельно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі зарядів на кожному із них:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_N; \quad q = \sum_{i=1}^N q_i.$$

Паралельне з'єднання застосовують для того, щоб дістати більшу ємність, ніж ємність одного конденсатора.

Загальна ємність батареї паралельно з'єднаних конденсаторів

дорівнює сумі ємностей окремих конденсаторів:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots; C = \sum_{i=1}^N C_i,$$

де N - кількість конденсаторів у батареї.

Якщо всі N конденсаторів, з'єднані паралельно, мають однакову ємність C , то

$$q = Nq',$$

де q' - заряд кожного конденсатора.

Ємність батареї, що складається з N паралельно з'єднаних конденсаторів, в N разів більша ємності кожного із них:

$$C = NC'.$$

Послідовне з'єднання конденсаторів

При *послідовному* з'єднанні обкладки окремих конденсаторів мають заряди, чисельно однакові, але протилежні за знаком, тобто

$$q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_N = q,$$

де N - число конденсаторів в батареї.

Загальна напруга (різниця потенціалів) на батареї послідовно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі напруг (різниці потенціалів) на кожному конденсаторі:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N; U = \sum_{i=1}^N U_i.$$

Якщо всі N послідовно з'єднаних конденсаторів мають однакову ємність C , то

$$U = NU'.$$

Величина, обернена загальній ємності послідовно з'єднаних конденсаторів, дорівнює сумі величин, обернених ємностей окремих конденсаторів:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots; \frac{1}{C} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}.$$

У цьому з'єднанні ємність батареї менша від ємностей окремих конденсаторів ($C < C_i$).

Для двох конденсаторів:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Загальна ємність N однакових, послідовно з'єднаних конденсаторів, в N разів менша ємності кожного конденсатора:

$$C = \frac{C'}{N}.$$

Отже, загальна ємність послідовно з'єднаних конденсаторів менша ємності будь-якого з них.

Енергію, зосереджену в електростатичному полі нерухомих заряджених тіл, називають *електростатичною*.

Електричну енергію електричного поля визначають так:

$$W_e = \frac{CU^2}{2};$$
$$W_e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd,$$

де $Sd = V$ - об'єм, що займає поле.

$$W_e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V.$$

Об'ємна густина енергії електричного поля (густина енергії) – це відношення енергії електричного поля до його об'єму:

$$\omega_e = \frac{W_e}{V}; \quad \omega_e = \frac{W_e}{Sd},$$

де $Sd = V$ - об'єм зайнятий електричним полем – добуток відстані між пластинами на площу пластин.

Отже, об'ємна густина енергії електричного поля дорівнює енергії цього поля в одиниці об'єму простору, занятого ним.

$$\omega_e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}.$$

Одиниця об'ємної густини енергії електричного поля в СІ – *джоуль на метр кубічний*: $\left[1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}\right] \cdot 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ - об'ємна густина енергії такого поля, в кожному кубічному метрі якого зосереджена енергія 1 Дж.

Ця формула справедлива не тільки для однорідного поля плоского конденсатора, а й для будь-якого іншого електростатичного поля. Більше того, даний вираз для густини енергії виявляється справедливим і для змінних електричних полів.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Силою струму називається скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює величині заряду, що переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу, якщо за нескінченно малий проміжок часу dt через поперечний переріз провідника переноситься електричний заряд dq , то сила струму буде:

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

Для постійного струму

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

Тобто, сила постійного струму дорівнює заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

Сила струму скалярна величина. Одиниця сили струму в СІ є *ампер*: $\left[1\text{ A} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}}\right]$. *Ампер* – сила постійного струму, який, проходячи по двох паралельних провідниках нескінченної довжини і зовсім малого поперечного перерізу розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликав би між ними силу взаємодії, яка б дорівнювала б $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ на кожний метр їх довжини.

Сила постійного струму у металевому провіднику:

$$I = qn_0 v S,$$

де q - заряд; n_0 - концентрація зарядів; v - швидкість упорядкованого руху зарядів; S - площа перерізу провідника.

Сила струму в провіднику прямо пропорційна концентрації носіїв заряду в ньому, швидкості їх впорядкованого руху і площі поперечного перерізу провідника.

Густина струму \vec{j} - векторна величина, яка чисельно дорівнює відношенню сили струму I , що проходить крізь перпендикулярну до напрямку руху носіїв поверхню S , до площі цієї поверхні, тобто

$$j = \frac{I}{S}; \quad j = \frac{dI}{dS}.$$

Густина струму дорівнює силі струму, що проходить через одиницю площі поперечного перерізу провідника при рівномірному розподілі зарядів по ньому.

Вектор густини струму напрямлений вздовж струму. Одиницею густини струму є *ампер на метр квадратний* $\left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2}\right]$. $1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$ - густина струму силою 1 А, рівномірно розподіленого по площі 1 м^2 , перпендикулярній напрямку впорядкованого руху зарядів, що створюють струм.

Густина струму провідності в металах:

$$\vec{j} = en\vec{v},$$

де e - заряд електрона.

Густина струму в провіднику прямо пропорційна концентрації носіїв заряду і швидкості їх впорядкованого руху.

Сила струму в однорідному провіднику прямо пропорційна напрузі на кінцях цього провідника

$$I = kU,$$

де k - коефіцієнт пропорційності, який називають *провідністю провідника*.

Електропровідність провідника це величина, обернена до його опору.

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

Електропровідність скалярна додатна величина. Одиниця електропровідності – *сименс*: $\left[1 \text{ См} = \frac{1}{\text{Ом}}\right]$. 1 См - це електропровідність (провідність) провідника опором L .

Електричним опором провідника називають міру можливості провідника перешкоджати впорядкованому русі по ньому електричних зарядів, тобто проходженню струму.

Встановлено, що сила струму в колі залежить не тільки від напруги, а й від властивостей провідників, увімкнених у коло. Залежність сили струму від властивостей провідника пояснюється тим, що різні провідники мають різні *електричні опори* (позначають літерою R). Або це обернена величина до провідності $R = \frac{1}{k}$ називається *електричним опором провідника*.

Опір провідника R дорівнює відношенню напруги U на провіднику до сили струму I в ньому:

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

Опір провідника – скалярна позитивна величина. Опір в системі СІ вимірюють в *омах*: $\left[1 \text{ Ом} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}}\right]$. 1 Ом – опір такого провідника, в якому при напрузі на кінцях 1 *вольт* сила струму дорівнює 1 *амперу*.

Із зміною температури опір провідника змінюється:

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha t,$$

де R_0 - опір провідника при 0°C ; R - опір провідника при температурі t ; α - коефіцієнт пропорційності (температурний коефіцієнт опору).

$$R = R_0(1 + \alpha t), \text{ або } R = R_0(1 + \alpha \Delta T),$$

де $\Delta T = T - T_0$; T_0 - початкова температура провідника; T - його кінцева температура.

Одиниця температурного коефіцієнта опору в СІ – *кельвін у мінус першій степені*: $[K^{-1}]$. Температурний коефіцієнт опору дорівнює відносній зміні опору провідника при нагріванні на 1 K . Для всіх металевих провідників $\alpha > 0$ і дуже мало змінюється із зміною температури.

Для чистих металів:

$$\alpha \approx \frac{1}{273} K^{-1}.$$

Опір однорідного провідника при не дуже великих струмах не залежить від сили струму, а визначається геометричними розмірами провідника, хімічною природою матеріалу та його фізичним станом (температура, тиск). Тобто *опір прямо пропорційний довжині провідника, обернено пропорційний площі його поперечного перерізу й залежить від матеріалу провідника.*

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

де l - довжина провідника; S - площа його поперечного перерізу; ρ - коефіцієнт пропорційності, який залежить від властивостей матеріалу та фізичного стану провідника (його називають *питомим опором*).

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Питомий опір скалярна позитивна величина. Одиниця питомого опору в СІ є *ом·метр*: $[Ом \cdot м]$. $1 Ом \cdot м$ - це питомий опір речовини такого провідника, кожний метр якого має опір $1 Ом$ при площі поперечного перерізу $1 м^2$. Метали мають малий питомий опір, діелектрики – дуже великий.

З підвищенням температури провідника підсилюються теплові коливання іонів решітки, при цьому опір провідника для проходження по ньому струму *зростає*. Залежність питомого опору металів від температури відображає формула:

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

де ρ_0 - питомий опір при температурі $0^\circ C$; ρ - питомий опір при температурі t .

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T),$$

де $\Delta T = \Delta t^\circ C$ - зміна температури за шкалою Кельвіна.

З формули видно:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 t}.$$

Оскільки α мало змінюється зі зміною температури, то вважають, що питомий опір лінійно залежить від температури.

Питомий опір – це величина, яка чисельно дорівнює опору провідника довжиною $1 м$ і поперечним перерізом $1 м^2$.

Величину, обернену питомому опору ρ , називають *питомою електропровідністю* (або *питомою провідністю*) σ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

Питома електропровідність, як і питомий опір, - скалярна додатна

величина. Одиниця вимірювання питомої електропровідності в СІ – *одиниця на ом-метр*: $\left[\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} \right]$.

Скалярну величину ξ , яка дорівнює роботі сторонніх сил, віднесений до одиниці позитивного заряду, називають *електрорушійною силою* (ЕРС) джерела струму, що діє в замкненому колі або на його ділянці.

$$\xi = \frac{A}{q}.$$

Електрорушійна сила дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиничного заряду.

ЕРС – скалярна алгебраїчна величина, тобто вона може бути додатною або від’ємною. *ЕРС контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС кожного джерела.*

Електрорушійна сила є енергетичною характеристикою самого джерела струму. В системі одиниць СІ ЕРС вимірюють у *вольтах*.

В джерелі струму на вільні заряди окрім сил Кулона діють також і сили неелектричного походження (хімічного в гальванічних елементах і акумуляторах, механічного і магнітного в генераторах струму і т.д.). Ці сили отримали назву *сторонніх сил*.

Тобто *сторонні сили* – це сили неелектричного походження, які можуть підтримувати різницю потенціалів на кінцях провідника.

Ділянка кола, що містить джерело струму називається *неоднорідною*.

ЕРС джерела дорівнює різниці потенціалів на його полюсах при розімкнутому зовнішньому колі.

$$U = \frac{A}{q}.$$

Напруга на ділянці кола, яке містить джерело струму (неоднорідній ділянці кола), дорівнює відношенню роботи переміщення заряду, що виконується як силами Кулона, так і сторонніми силами, до величини перенесеного заряду. З фізичної точки зору: напруга на ділянці кола, що містить джерело струму, чисельно дорівнює роботі по перенесенню одиничного заряду, що виконується силами Кулона і сторонніми.

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \xi.$$

Напруга на даній ділянці кола дорівнює сумі різниці потенціалів і ЕРС, що діє на цій ділянці.

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Напруга на ділянці кола, що не містить ЕРС дорівнює різниці потенціалів на кінцях цієї ділянки.

$$U = \xi.$$

В замкнутій системі напруга на зовнішній і внутрішній її ділянці

дорівнює ЕРС джерела струму.

$$\xi = U_{\text{зовніш.}} + U_{\text{внут.}}$$

ЕРС джерела струму дорівнює сумі напруг на всіх ділянках замкнутого кола.

При *послідовному* з'єднанні джерел струму загальна електрорушійна сила дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил кожного джерела:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n.$$

При *паралельному* з'єднанні джерел струму з однаковою електрорушійною силою, загальна електрорушійна сила дорівнює електрорушійній силі одного елемента:

$$\xi = \xi_1.$$

При впорядкованому русі заряджених частинок у провіднику електричне поле виконує роботу, яку прийнято називати *роботою струму*.

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2); A = qU,$$

де $\Delta q = I\Delta t$.

Робота струму на ділянці кола дорівнює добутку сили струму на напругу і час, протягом якого робота виконувалася.

$$A = IU\Delta t; A = I^2 R t; A = \frac{U^2}{R} t.$$

Для замкнутого кола, що має ЕРС ξ , формула роботи струму у всьому колі буде:

$$A = \xi I t.$$

Одиниця роботи в СІ – джоуль: $[A \cdot B \cdot c = \text{Дж}]$.

На практиці роботу електричного струму вимірюють спеціальними приладами, які називають *лічильниками*.

Співвідношення між одиницею роботи: $[1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}]$.

Так як будь-який електричний прилад розрахований на використання певної енергії за одиницю часу, тому поряд з роботою важливе значення має поняття *потужності*.

Потужність постійного струму дорівнює відношенню роботи струму A за час Δt до цього інтервалу часу.

$$P = \frac{A}{\Delta t}, \text{ або } P = IU.$$

Потужність струму на деякій ділянці кола дорівнює добутку напруги на цій ділянці і силі струму в ньому.

$$P = I^2 R; P = \frac{U^2}{R}; P = \xi I.$$

Одиниця потужності в СІ - ват: $[A \cdot B = \text{Вт}]$.

Потужність електричного струму в колі вимірюють безпосередньо

приладами, які називаються *ватметри*.

Співвідношення між одиницею потужності: $[1 \text{ к.с.} = 736 \text{ Вт}]$.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) кола – це відношення корисної роботи до затраченої:

$$\eta = \frac{A_k}{A_z} \cdot 100\%,$$

де $A_k = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$ - корисна робота постійного струму;

$A_z = \xi I t = I^2 (R + r) t$ - затрачена робота джерела струму.

$$\eta = \frac{UI t}{\xi I t} \cdot 100\%; \quad \eta = \frac{U}{\xi} \cdot 100\%; \quad \eta = \frac{UI t}{I^2 (R + r) t} \cdot 100\%;$$

де U - напруга на зовнішній ділянці кола.

$$\eta = \frac{IR}{I(R + r)} \cdot 100\%; \quad \eta = \frac{R}{R + r} \cdot 100\%,$$

де R - опір всієї зовнішньої частини кола; r - опір джерела струму.

Коефіцієнт корисної дії електричного кола можна визначати відношенням напруги на ділянці, де виконується корисна робота або корисно використовується теплова енергія, до ЕРС джерела струму, або

ККД електричного кола можна визначати відношенням опору ділянки кола, де виконується корисна робота або корисно використовується тепло, до суми опорів зовнішньої і внутрішньої ділянки кола, вираженого у відсотках.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩ

Роботу, яку треба виконати для того, щоб перевести електрон з металу в навколишній простір, називають *роботою виходу*. Робота виходу електрона з металу дорівнює різниці потенціальних енергій електрона поза металу і всередині металу. Вона для різних металів неоднакова, а також залежить від стану поверхні металу і особливо від домішок.

$$A = e\Delta U.$$

Контактною різницею потенціалів або *поверхневим стрибком потенціалу* називається різниця потенціалів між електронною хмаркою і металом. *Електронна хмара* – частина простору навколо ядра атома, в якому найімовірніше перебування електрона.

Контактна різниця потенціалів виникає при контакті різнорідних металів або напівпровідників. Контактна різниця потенціалів залежить від різниці потенціалів виходу контактуючих матеріалів, абсолютної температури контакту, відмінності концентрацій електронів у них:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1},$$

де $\varphi_1 - \varphi_2$ - різниця потенціалів виходу контактуючих матеріалів; k - стала Больцмана; T - абсолютна температура контакту; e - елементарний заряд; n_1, n_2 - концентрації електронів.

Явище Зесбека – поява електрорушійної сили і струму в замкненому колі з різнорідних металів, коли два спаї його перебувають при різній температурі. Для двох металів з потенціалами виходу φ_1 і φ_2 і концентрацією електронів n_1 і n_2 контактна різниця на гарячому контакті

$$\Delta\varphi_r = \varphi_1 - \varphi_2 + \frac{kT_r}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$$

де k - стала Больцмана; T_r - температура гарячого контакту; e - елементарний заряд;

Різниця потенціалів на холодному спаї

$$\Delta\varphi_x = \varphi_1 - \varphi_2 + \frac{kT_x}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$$

де T_x - температура холодного спаю.

Результуюча різниця потенціалів у колі (термоелектрорушійна сила)

$$\xi = \Delta\varphi_r - \Delta\varphi_x = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} (T_r - T_x) = \alpha (T_r - T_x).$$

Явище Пельтьє – поглинання або виділення теплоти на контакті різнорідних металів (напівпровідників) при проходженні на ньому струму. При цьому один спай нагрівається, а другий охолоджується. Виділена теплота:

$$Q = \chi It,$$

де χ - коефіцієнт Пельтьє; I - сила струму; t - час.

Термопара – електричне коло із двох різних металів (спаїв), в якому виникає термоелектрорушійна сила, прямо пропорційна різниці температур у контактах

$$\xi = U_{1,2} + U_{2,1},$$

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

Термобатарея – послідовне поєднання кількох термопар.

МАГНІТНІ ЯВИЩА

Векторну величину, що характеризує магнітне поле, називають вектором магнітної індукції. Позначають буквою \vec{B} .

Вектор магнітної індукції \vec{B} є силовою характеристикою магнітного поля в кожній точці. Напрямок і величину вектора індукції визначають за дією магнітного поля на магнітну стрілку та провідник із струмом.

Для визначення магнітної індукції користуються правилом свердлика: якщо свердлик повертати так, щоб його поступальний рух збігався з напрямом струму \vec{I} , то обертальний рух рукоятки покаже напрям ліній магнітної індукції. Також зручним є правило обхвату правою рукою: якщо великий палець правої руки спрямувати в напрямі струму, а рештою пальців обхопити провідник із струмом, то вони покажуть напрям ліній магнітної індукції (і вектора \vec{B}).

Для магнітних полів характерним є принцип суперпозиції: магнітні поля не взаємодіють, а тільки накладаються:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

Модуль магнітної індукції вимірюється силою, з якою магнітне поле діє на одиницю довжини провідника, по якому проходить одиничний струм і який розміщений перпендикулярно до напрямку ліній магнітного поля:

$$B = \frac{F}{l}; \quad B = \frac{dF}{Idl}.$$

Модуль магнітної індукції вимірюється силою, з якою магнітне поле діє на рухомий позитивний заряд, до величини цього заряду та швидкості його руху:

$$B = \frac{F}{qv}.$$

Модуль магнітної індукції дорівнює відношенню максимального моменту сил, якими магнітне поле обертає рамку з постійним струмом, до сили струму в рамці і площі, обмеженої рамкою:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}.$$

Фізичний зміст: індукція магнітного поля дорівнює максимальному моменту сил, що обертає рамку одиничної площі з одиницею сили струму в ній.

Вектор \vec{B} є силовою характеристикою магнітного поля. Одиниця \vec{B} у СІ – тесла: $\left[1 \frac{H \cdot m}{A \cdot m^2} = 1 \frac{H}{A \cdot m} = 1 \frac{B \cdot c}{m^2} = 1 \frac{Bb}{m} = 1 Tл \right]$. За одиницю магнітної індукції беруть магнітну індукцію такого поля, у якому на рамку площею $1 m^2$ при силі струму $1 A$ діє з боку поля момент сил $M = 1 H \cdot m$ – тесла. Або $1 Tл$ – це індукція такого однорідного магнітного поля, в якому на провідник довжиною $1 m$ з струмом $1 A$ діє максимальна сила Ампера $1 H$.

Крім магнітної індукції \vec{B} вводиться також друга векторна

характеристика магнітного поля, яка називається *напруженістю*.

Напруженість магнітного поля \vec{H} - векторна величина, яка не залежить від магнітних властивостей середовища і характеризує магнітне поле в кожній точці за пов'язаним з ним струмом і положенням точки.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{м}$ - магнітна стала (або $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma_H}{м}$); μ - магнітна проникність середовища.

Іншими словами: відношення індукції зовнішнього магнітного поля B_0 , створеного у вакуумі, до магнітної сталої μ_0 називається *напруженістю зовнішнього магнітного поля* H .

$$H = \frac{B}{\mu_0}.$$

Вектори $d\vec{B}$ і $d\vec{H}$ збігаються за напрямом, їх напрям визначають за правилом векторного добутку або за правилом обхвату правою рукою.

З електростатики відомо, що вектор електричного зміщення \vec{D} не залежить від властивостей середовища. Тому можна сказати, що аналогом вектора \vec{D} електричного поля є вектор напруженості \vec{H} магнітного поля.

Напруженість магнітного поля прямого струму:

$$H = \frac{I}{2\pi R}.$$

Модуль вектора магнітної індукції магнітного поля прямого струму:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi R}.$$

Напруженість магнітного поля колового струму:

$$H = \frac{I}{2R}.$$

Модуль вектора магнітної індукції магнітного поля колового струму:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}.$$

Індукція магнітного поля колового струму прямо пропорційна силі струму і обернено пропорційна його радіусу.

Вектор \vec{H} напрямлений уздовж осі колового струму, і його напрям визначається за правилом свердлика: *якщо рукоятку свердлика повертати в напрямі струму, то поступальний рух свердлика покаже напрям \vec{H} (і ліній напруженості).*

Якщо котушку зробити нескінченно довгою, то всередині неї магнітне поле буде *однорідним*. Тобто якщо довжина соленоїда значно перевищує

його діаметр, магнітне поле у його середній частині практично однорідне і його модуль дорівнює

$$B = \frac{\mu_0 \mu N I}{l},$$

де N - кількість витків.

Оскільки

$$n = \frac{N}{l},$$

де n - число витків котушки на одиницю її довжини (або концентрація витків); l - довжина котушки у якій міститься N витків.

Тоді

$$B = \mu_0 \mu n I.$$

Індукція всередині нескінченно довгого соленоїда (або тороїда) прямо пропорційна числу витків на одиницю довжини соленоїда і силі струму в ньому.

На провідник з струмом в магнітному полі діє сила, яка називається силою Ампера.

А. Ампер експериментально встановив, що сила F , яка діє на прямолінійний провідник із струмом, що перебуває в однорідному магнітному полі, прямо пропорційна струму I і довжині провідника l , магнітній індукції \vec{B} і синусові кута α між напрямом струму і вектором \vec{B} :

$$F = BIl; F = BIl \sin \alpha$$

або

$$d\vec{F} = I \vec{B} dl \sin(\vec{dl}, \vec{B}).$$

Напрямок сили Ампера визначають за правилом лівої руки: якщо долоню лівої руки розмістити так, що лінії індукції B входили в долоню, а витягнуті пальці показували напрям струму I , то відхилений великий палець покаже напрям сили Ампера.

Сила Ампера діє на провідник із струмом.

Напрямок вектора обертаючого моменту сил M_{\max} можна знайти за правилом буравчика: якщо головку буравчика обертати за напрямком обертаючої дії сил, прикладених до контуру з струмом в магнітному полі, то поступальний рух буравчика буде співнаправлений з вектором моменту сили.

Величину моменту сил M , що обертають контур площиною S з силою струму I в магнітному полі з індукцією \vec{B} , можна визначити за формулою:

$$M = BIS \sin \alpha,$$

де α - кут між напрямком вектора індукції магнітного поля і

напрямком позитивної нормалі \vec{n} до контуру.

За напрям позитивної нормалі \vec{n} прийнято напрям поступального руху правого гвинта, якщо головку обернути за струмом в рамці.

Момент сил, що обертають контур з струмом в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку індукції цього поля, силі струму в контурі площі контуру і синусу кута між векторами магнітної індукції і нормалі до площини контуру.

Силу, що діє на рухому заряджену частинку у магнітному полі називають силою Лоренца.

Модуль сили Лоренца дорівнює відношенню модуля F сили, що діє на відрізок провідника завдовжки Δl , до кількості N заряджених частинок, які рухаються впорядковано на цьому відрізку провідника:

$$F_L = \frac{F}{N}. \quad \vec{F}_L = q\vec{v}\vec{B}\sin\alpha; \quad \vec{F}_L = q\vec{v}\vec{B}\sin(\vec{v}, \vec{B}).$$

Сила Лоренца, що діє на заряд, який рухається в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку індукції цього поля на заряд, на швидкість його руху і на синус кута між напрямком магнітного поля і напрямком руху заряду (тобто між напрямками векторів \vec{v} і \vec{B}).

Сила Лоренца перпендикулярна до векторів \vec{B} та \vec{v} . Напрямок сили Лоренца визначають за правилом векторного добутку або за правилом лівої руки, але якщо $q < 0$, то витягнуті пальці руки треба спрямувати проти вектора швидкості \vec{v} .

Правило лівої руки для визначення сили Лоренца: якщо долоню лівої руки розташувати так, щоб магнітні лінії входили в неї, а чотири витягнуті пальці направити за напрямком руху позитивного заряду (або проти напрямку руху від'ємного заряду), то великий палець, відведений на 90° , покаже напрям сили Лоренца.

Як би не була направлена сила Лоренца, вона завжди напрямлена вектору швидкості і, відповідно, вектору переміщення заряду, при цьому вона *роботи перенесення заряду в магнітному полі не виконує*, в результаті чого кінетична енергія заряду, що рухається в магнітному полі під дією сили Лоренца, не змінюється.

Таким чином, заряджена частинка, що влетіла в однорідне магнітне поле перпендикулярно до його магнітних ліній, *рухається рівномірно по колу*, що захоплює магнітні лінії.

Частинка рівномірно рухається по колу радіусом $r: m\frac{v^2}{r} = |q_0|vB$.

Звідки

$$r = \frac{mv}{|q_0|B}.$$

Якщо заряджена частинка влітає в магнітне поле під кутом до магнітних ліній, то вона буде *рухатися по гвинтовій лінії*. Відстань, яку вона пролетить вздовж магнітної лінії за один оберт, називається *шагом гвинта*.

Відносна магнітна проникність середовища показує, у скільки разів магнітна індукція у даному середовищі більша (чи менша), ніж у вакуумі (у вакуумі $\mu = 1$).

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

тобто характеризує магнітні властивості середовища.

В однорідному середовищі магнітна індукція дорівнює:

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0.$$

Отже, вектор магнітної індукції \vec{B} в однорідному середовищі відрізняється від вектора \vec{B}_0 у тій самій точці простору у вакуумі.

Абсолютна магнітна проникність

$$\mu_a = \mu_0 \mu.$$

Магнітний момент ($\vec{p}_{\text{маг}}$) колового струму – це вектор, модуль якого спрямований перпендикулярно площі колового струму за правилом буравчика

$$p_{\text{маг}} = IS.$$

Магнітним потоком Φ крізь площину (поток вектора магнітної індукції) називається добуток індукції магнітного поля на величину площини, тобто якщо магнітна індукція \vec{B} перпендикулярна до площі поверхні, то

$$\Phi = BS.$$

Магнітний потік через деяку площину дорівнює кількості магнітних ліній, що пересікають цю площину.

Магнітний потік Φ (потік магнітної індукції), що пронизує поверхню площею S :

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

де $\alpha = \left(\vec{n}, \vec{B} \right)$; \vec{n} - вектор нормалі до поверхні.

Магнітний потік, що створений однорідним магнітним полем крізь деяку площадку в ньому, дорівнює добутку індукції цього магнітного поля на величину площадки і на косинус кута між вектором магнітної індукції і нормаллю до площадки. Або іншими словами: магнітним потоком Φ через поверхню з площею S називають величину, що дорівнює добутку модуля вектора магнітної індукції \vec{B} на площу S і косинус кута α між векторами \vec{B} і \vec{n} .

Якщо прийняти, що

$$B \cos \alpha = B_n,$$

то

$$\Phi = B_n S.$$

Тоді *магнітним потоком* Φ через площу поверхні S , розташовану перпендикулярно до ліній індукції, називають величину, що дорівнює добутку магнітної індукції B на площу S .

На практиці ці дії зводяться до інтегрування по всій площині S :

$$\Phi = \int_S B_n dS,$$

де B_n - проекція вектора \vec{B} на нормаль \vec{n} до площі.

Магнітний потік характеризується кількістю силових ліній магнітної індукції B через поверхню площею S .

Повний потік вектора магнітної індукції через замкнуту поверхню дорівнює нулю.

Магнітний потік – скалярна алгебраїчна величина, тобто він може бути додатним і від’ємним, оскільки косинус кута α може бути більшим і меншим нуля. Одиниця магнітного потоку в СІ – *вебер* $[1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ В} \cdot \text{с} = 1 \text{ Вб}]$. 1 Вб - це магнітний потік, створений однорідним магнітним полем індукцією 1 Тл скрізь площадку 1 м^2 , що перпендикулярна магнітним лініям.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

На різних дослідах М. Фарадей показав, що при всяких змінах магнітного поля в області, обмеженій контуром провідника, в останньому виникає *електрорушійна сила індукції*.

Відношення роботи A_{cm} сторонніх сил – сил Лоренца F_L - до величини заряду q , що переміщується ними дорівнює ЕРС індукції ξ_i :

$$\xi_i = \frac{A_{cm}}{q}.$$

ЕРС індукції у прямолінійному провіднику l , що рухається відносно магнітного поля зі швидкістю v

$$\xi_i = Blv \sin \alpha,$$

де α кут між вектором магнітної індукції \vec{B} і вектором швидкості \vec{v} .

ЕРС індукції, що виникає в провіднику, який рухається поступально в однорідному магнітному полі під кутом до магнітних ліній, дорівнює добутку індукції цього поля на швидкість провідника, на його довжину в цьому полі і на синус кута між вектором індукції магнітного поля і вектором швидкості провідника.

Правило правої руки: якщо долоню правої руки розмістити так, щоб

вектор індукції магнітного поля входив в неї, а великий палець, відставлений на 90° , направити в напрямку руху провідника, то чотири витягнутих пальці покажуть напрямок індукційного струму в провіднику.

По проходженні по провіднику індукційного струму він нагрівається, тобто

$$Q = I_i^2 R t; \quad Q = \frac{\xi_i^2}{R} t,$$

де R - опір провідника.

Індукційний струм – це струм, що виникає у замкнутому провідному контурі, коли змінюється кількість ліній магнітної індукції, що пронизують площу, обмежену цим контуром. Або сила індукційного струму I_i прямо пропорційна ЕРС індукції ξ_i і обернено пропорційна опору контуру R :

$$I_i = \frac{\xi_i}{R}, \text{ або } I_i = -\frac{\Delta\Phi}{R\Delta t}.$$

Для контуру з N витків:

$$I_i = -N \frac{\Delta\Phi}{R\Delta t}.$$

Індукційний струм в провіднику виникає тільки тоді, коли магнітний потік скрізь площину, обмежену цим провідником, змінюється.

Правило для визначення напрямку індукційного струму запропонував в 1833 р. Е. Ленц: *напрямок індукційного струму завжди такий, що його власне магнітне поле протидіє тій зміні магнітного потоку, яке збуджує індукційний струм.*

Напрямок індукційного струму зручно визначати за правилом правої руки: якщо праву руку розмістити так, щоб лінії індукції магнітного поля входили в долоню, а відставлений під кутом великий палець збігався з напрямом переміщення провідника, то чотири випрямлені пальці вкажуть напрям індукційного струму в провіднику.

Узагальнене правило Ленца: *виникаючі в процесах індукції поля, струми і сили завжди протидіють тому процесу, який викликає індукція.*

Електрони в нерухомому провіднику приводяться в рух електричним полем і це поле безпосередньо породжується змінним магнітним полем. Тим самим стверджується нова фундаментальна властивість електромагнітного поля: *змінюючись у часі, магнітне поле породжує електричне поле.* (Максвелл).

Для кількісної оцінки самоіндукції провідника введено фізичну величину, яка називається *індуктивністю*. Індуктивність позначають літерою L . Фізична суть така: що для заданого контуру потік магнітної індукції пропорційний вектору індукції, а згідно законом Біо-Савара-Лапласа, вектор індукції пропорційний силі струму в контурі.

Магнітний потік, обмежений контуром, пропорційний величині

струму, тобто

$$\Phi = LI,$$

де L - коефіцієнт пропорційності, який виражає індуктивність даного контуру.

$$L = \frac{\Phi}{I}; L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta I}.$$

Індуктивність контуру – це фізична величина, яка вимірюється магнітним потоком через площу, обмежену контуром, якщо в цьому контурі проходить одиничний струм і немає інших джерел магнітного поля.

Індуктивність контуру – скалярна додатна величина. Одиниця індуктивності в СІ - *генрі*: $\left[1 \frac{Вб}{А} = 1 Гн\right]$. *Генрі* – це індуктивність провідника, навколо якого магнітний потік змінюється на 1 Вб при зміні в ньому сили струму на 1 А.

Індуктивність можна визначити і через ЕРС самоіндукції:

$$L = \xi_c \frac{\Delta t}{|\Delta I|}; L = \xi_c \frac{dt}{|dI|}.$$

Індуктивність контуру дорівнює модулю відношення ЕРС самоіндукції в контурі до швидкості зміни сили струму в ньому.

Індуктивність – це фізична величина, яка чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі внаслідок зміни струму на 1 А за 1 с.

Означення одиниці індуктивності можна дати ще й так: $\left[1 \frac{В \cdot с}{А} = 1 Гн\right]$.

Генрі – це індуктивність провідника, в якому виникає ЕРС самоіндукції 1 В при зміні сили струму в ньому на 1 А за 1 с.

Індуктивність, як і електроємність, залежить від геометричних факторів: від розмірів провідника і його форми, але не залежить безпосередньо від сили струму в провіднику. Крім того, індуктивність залежить від магнітних властивостей середовища, в якому знаходиться провідник.

Індуктивність соленоїда максимально залежить від кількості витків N і магнітних властивостей осердя μ :

$$L = \frac{\mu_0 \mu N^2 S}{l};$$
$$L = \mu_0 \mu n^2 V,$$

де $N_0 = \frac{N}{l}$ - число витків на одиницю довжини соленоїда $[м^{-1}]$; $V = Sl$ - об'єм соленоїда $[м^3]$.

$$L = \mu_0 \mu n^2 l S.$$

Індуктивність соленоїда прямо пропорційна квадрату числа витків на одиниці довжини соленоїда, його довжині, площі витка і магнітній проникності осердя.

При послідовному сполученні контурів - індуктивність:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n.$$

При паралельному сполученні контурів - індуктивність:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}.$$

Магнітне поле, пов'язане з електричним струмом, характеризується певною енергією – *енергією магнітного поля*. Ця енергія чисельно дорівнює роботі, яка виконується струмом на подолання ЕРС самоіндукції за час, коли струм зростає від нуля до свого сталого значення.

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

Формула визначає енергію магнітного поля замкненого провідного контуру зі струмом I та індуктивністю L .

Тобто *енергія магнітного поля соленоїда з струмом дорівнює половині добутку індуктивності цього соленоїда на квадрат сили струму в ньому.*

Енергія магнітного поля соленоїда:

$$W_m = \frac{\mu_0 \mu N_0^2 I^2}{2} Sl; W_m = \frac{\mu_0 \mu N_0^2 I^2}{2} V; W_m = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} V,$$

$$\text{де } B = \frac{\mu_0 \mu N}{l} I; I = \frac{Bl}{\mu_0 \mu N}.$$

Густина енергії магнітного поля – це енергія, яка міститься в одиниці об'єму магнітного поля:

$$\omega_m = \frac{W_m}{V},$$

де V - об'єм зайнятий магнітним полем.

Фізичний зміст густини енергії: *об'ємна густина енергії магнітного поля дорівнює енергії цього поля в одиниці об'єму простору, зайнятого ним.*

$$\omega_m = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}.$$

Об'ємна густина енергії магнітного поля прямо пропорційна квадрату магнітної індукції цього поля і обернено пропорційна відносній магнітній проникності середовища, занятої ним.

Цей вираз для густини енергії магнітного поля застосовний і до поля, створеного провідниками будь-якої форми, а також до поля постійних магнітів.

Густина енергії магнітного поля – скалярна додатна величина.

Одиниця в СІ густини енергії – джоуль на кубічний метр $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right]$. $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ - об'ємна густина енергії такого магнітного поля, яке в кожному кубічному метрі простору, зайнятого ним, має енергію 1 Дж .

ЗМІННИЙ СТУМ

Магнітний потік, який пронизує контур рамки, виражається так:

$$\Phi = BS \cos \varphi; \quad \Phi = BS \cos \omega t ,$$

де ωt - фаза, або кут між напрямом нормалі n до площини рамки і напрямом вектора \vec{B} ; ω - циклічна частота; S - площа рамки.

Якщо

$$BS = \Phi_0 ,$$

де Φ_0 - максимальне значення магнітного потоку,

то

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t .$$

Величина електрорушійної сили визначається так:

$$e_i = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad e_i = BS \omega \sin \alpha; \quad e_i = BS \omega \sin \omega t .$$

ЕРС індукції, що виникає в контурі, який обертається рівномірно в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку індукції магнітного поля, площі контуру на кутову швидкість контуру і на синус кута між вектором магнітної індукції і нормаллю до площини контуру.

Якщо кут $\alpha = 90^\circ$, то $\sin \alpha = 1$, тоді ЕРС індукції в колі буде максимальна і дорівнює:

$$\xi_0 = BS \omega .$$

Максимальна ЕРС індукції, що виникає в контурі, який рівномірно обертається в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку індукції магнітного поля на площу контуру в магнітному полі і на кутову швидкість контуру.

Інший запис:

$$e_i = \Phi_0 \omega \sin \omega t .$$

Якщо рамка складається не з одного, а з N витків, то електрорушійна сила індукції

$$e_i = -N \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_i = NBS \omega \sin \omega t ,$$

Максимальне (амплітудне) значення електрорушійної сили:

$$\xi_0 = NBS \omega; \quad e_i = N\Phi_0 \omega \sin \omega t ,$$

де $\Phi_0 \omega = \xi_0$ - амплітудне (максимальне) значення електрорушійної сили.

$$e_i = \xi_0 N \sin \omega t .$$

Напруга змінюється за синусоїдним законом:

$$u = U_0 \sin \omega t ,$$

де U_0 - амплітуда напруги, тобто максимальне за модулем значення напруги.

У колі виникає змінний струм тієї самої частоти:

$$i = I_0 \sin(\omega t + \varphi),$$

де I_0 - амплітуда сили струму, тобто максимальне за модулем значення сили струму; φ - різниця (зсув) фаз між коливаннями сили струму і напруги.

Величина, що дорівнює квадратному кореню із середнього значення квадрата сили струму, називається *діючим значенням сили змінного струму (ефективне)*:

$$I = \sqrt{\bar{i}^2} ; I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} .$$

Діюче значення сили змінного струму дорівнює силі постійного струму, що виділяє в провіднику таку саму кількість теплоти, як і змінний струм, за той самий час.

Величина, що дорівнює квадратному кореню із середнього значення квадрата напруги, називається *діючим значенням напруги змінного струму (ефективне)*:

$$U = \sqrt{\bar{u}^2} ; U = \frac{U_0}{\sqrt{2}} .$$

Діюче значення ЕРС змінного струму

$$\xi = \frac{\xi_0}{\sqrt{2}} .$$

Будь-які електровимірювальні прилади, ввімкнені в коло змінного струму, показують його діючі значення.

Величина R , яка називалася в колах постійного струму електричним опором або просто опором у колі змінного струму називається *активним опором*.

Амплітуда сили струму визначається рівністю

$$I_0 = \frac{U_0}{R} .$$

Котушка індуктивності L чинить опір змінному струму. Величину R_L , що дорівнює добутку циклічної частоти на індуктивність, називають *індуктивним опором*.

$$R_L = \omega L .$$

Амплітуда сили струму у котушці

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L}, \text{ або } I_0 = \frac{U_0}{\omega L}.$$

Змінний струм здатний проходити по колу в якому є конденсатор ємністю C

Величину R_c , обернену до добутку циклічної частоти на ємність конденсатора, називають *ємнісним опором*.

$$R_c = \frac{1}{\omega C}.$$

Амплітуда сили струму

$$I_0 = \frac{U_0}{R_c}, \text{ або } I_0 = U_0 \omega C.$$

Миттєве значення заряду в конденсаторі:

$$q = Q_0 \cos \omega t,$$

де Q_0 - амплітудне значення заряду конденсатора.

Вираз *робити* через амплітудні значення сили струму і напруги:

$$A = \frac{1}{2} I_0 U_0 \cos \varphi \cdot t,$$

де $t = T$ - час одного періоду.

Вираз *робити* через діючі (ефективні) значення сили струму і напруги:

$$A = IU \cos \varphi \cdot t.$$

Потужність у колі змінного струму визначається добутком сили струму на напругу:

$$P = IU$$

Миттєва потужність у колі змінного струму визначається такою формулою:

$$p = iu.$$

Середня потужність змінного струму:

$$P = \frac{A}{t}; P = \frac{1}{2} I_0 U_0 \cos \varphi$$

або

$$P = \frac{1}{2} I_0 U_0 \cos \varphi.$$

Середня потужність змінного струму за період дорівнює добутку діючих напруги і сили струму на косинус різниці фаз між коливаннями напруги і сили струму.

Потужність змінного струму на ділянці кола визначається саме діючим значенням струму і напруги. Через діючі (ефективні) значення сили струму і напруги формула набуває вигляду:

$$P = IU \cos \varphi.$$

Потужність змінного струму істотно залежить від косинуса кута зсуву

фаз, тому $\cos \varphi$ називають *коефіцієнтом потужності*.

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}}; \cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}};$$
$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

Зсув фаз між струмом і напругою визначається співвідношенням між активним і повним опором кола.

Напруга на обмотках трансформатора прямо пропорційна числу витків в них.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}.$$

ЕРС в обмотках трансформатора прямо пропорційна числу витків в них.

$$\frac{\xi_2}{\xi_1} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Сили струмів в обмотках трансформатора обернено пропорційні до числа витків у них.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Дане відношення називають *коефіцієнтом трансформації*.

$$k = \frac{U_2}{U_1}; k = \frac{N_2}{N_1}; \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

Коефіцієнт трансформації – це число, що визначає, у скільки разів відрізняється напруга, подана на первинну обмотку, від напруги, яку дістають на вторинній обмотці на холостому ході.

Якщо $k > 1$, то трансформатор підвищує напругу і його називають *підвищувальним*, а при $k < 1$ трансформатор є *знижувальним*.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора:

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \cdot 100\%; \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{м.} + P_{ст.}} \cdot 100\%,$$

де P_2 - потужність споживача; $P_{м.}$ - втрати в міді; $P_{ст.}$ - втрати в сталі на перемагнічування осердя і струми Фуко.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора η дорівнює відношенню енергії струму W_2 у вторинній обмотці до енергії струму W_1 в первинній обмотці, вираженому у відсотках:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} \cdot 100\%; \eta = \frac{U_2 I_2 t}{U_1 I_1 t} \cdot 100\%.$$

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ

Формула періодичних власних коливань, або формула Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Період власних електромагнітних коливань в коливальному контурі прямо пропорційний кореню квадратному із індуктивності котушки і ємності конденсатора.

З формули видно, що період T повинен збільшуватись із зростанням L і C . Справді, із збільшенням L струм повільніше зростає з часом і повільніше спадає до нуля. А чим більша ємність, тим більше часу потрібно для перезарядження конденсатора.

При коливальному процесі енергія поля зарядженого конденсатора

$$W_e = \frac{q^2}{2C}$$

перетворюється в енергію магнітного поля

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

в котушці індуктивності і навпаки.

Повна енергія в контурі:

$$W = W_e + W_m = \text{const}; W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}.$$

Повна енергія електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі W дорівнює максимальній енергії електричного поля $W_{m\dot{a}}$, яку контур отримує при зарядженні конденсатора, або рівна максимальній енергії магнітного поля котушки $W_{m\dot{i}}$, або дорівнює сумі миттєвих значень енергії електричного поля $W_{\dot{a}}$ і магнітного поля $W_{\dot{i}}$ в будь-який момент часу коливань:

$$W = W_{me} = W_{mm} = W_e + W_m.$$

Умова застосовності до реального контуру формули Томсона та й інших рівнянь, справедливих для контуру ідеального:

$$R \ll \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{L}{C}},$$

де R - активний опір контуру.

де $\sqrt{\frac{L}{C}}$ - величина, що називається *хвильовим опором контуру*.

Безрозмірна величина

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

називається *добротністю контуру*.

Якщо добротність коливального контуру в багато раз більше 1,5

(практично більше одиниці), то затуханням коливань в контурі можна знехтувати.

Добротність коливального контуру – його важлива характеристика, яка показує можливість контуру підтримувати в ньому електромагнітні коливання.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

В будь-якому іншому середовищі швидкість електромагнітних хвиль v в n раз менша, ніж у вакуумі:

$$n = \frac{c}{v},$$

де n - абсолютний показник заломлення даного середовища.

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}.$$

Абсолютний показник заломлення середовища дорівнює кореню квадратному із добутку його діелектричної і магнітної проникностей.

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі:

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}},$$

де $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ - швидкість світла.

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у будь-якому середовищі:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon\mu_0\mu}}; v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Довжина електромагнітної хвилі – це відстань, на яку поширюється хвиля за один період коливань \vec{E} і \vec{B} .

У повітрі

$$c = \lambda\nu; \lambda = \frac{c}{\nu}; \lambda = cT,$$

де ν , T - відповідно частота і період поширення електромагнітної хвилі.

У середовищі

$$v = \lambda\nu; \lambda = \frac{v}{\nu}, \lambda = vT,$$

де λ - віддаль між двома максимумами або мінімумами збурення електромагнітного поля.

Інтенсивність (I) - абсолютна величина рівна енергії, що переноситься хвилею за одиницю часу t через одиничну площадку S , розташовану перпендикулярно до нього.

$$I = \frac{W}{St}; I = \frac{\Delta W}{S\Delta t}.$$

Густина потоку випромінювання в СІ виражають у ватах на квадратний метр $\left[\frac{Вт}{м^2}\right]$.

Густина потоку випромінювання дорівнює добутку густини електромагнітної енергії на швидкість її поширення.

$$I = wv,$$

де w - густина перенесеної енергії; v - швидкість поширення хвилі (причому $W = wvSt$).

Густина потоку випромінювання від точкового джерела зменшується обернено пропорційно квадрату відстані до джерела.

$$I = \frac{W}{4\pi} \cdot \frac{1}{R^2},$$

де $S = 4\pi R^2$.

Густина потоку випромінювання пропорційна четвертому степеню частоти.

$$I \sim \omega^4. I = \frac{EB}{\mu_0\mu}.$$

Об'ємна густина енергії електромагнітної хвилі – це відношення електромагнітної енергії до одиниці об'єму.

$$w = \frac{W}{V}.$$

Вирази, що встановлюють залежність об'ємної густини енергії електромагнітної хвилі від силових характеристик електричного і магнітного полів, із яких вона складається: електричної напруженості E і магнітної індукції B :

$$w = \frac{EB}{\nu\mu_0\mu}; w = EB\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon}{\mu_0\mu}}.$$

$$w = w_e + w_m; w = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0\mu}.$$

Енергія електромагнітної хвилі, що знаходиться в одиниці об'єму простору, називається середньою об'ємною густиною енергії:

$$w = \frac{\Delta W}{\Delta V}; w = \frac{\Delta W}{Sc\Delta t}.$$

Об'ємна густина енергії електромагнітної хвилі і її потужність прямо пропорційна четвертій степені її частоти:

$$w = \left(\frac{qA}{4\pi rc^2}\right)^2 \frac{\omega^4}{\varepsilon_0},$$

де A - амплітуда коливань; ω - циклічна частота; r - відстань від

напруженості електричного поля до заряду.

Амплітуда напруженості електричного поля E_0 в електромагнітній хвилі прямо пропорційна квадрату частоти коливань заряду, що випромінює цю хвилю, або квадрату частоти коливань вектора напруженості у хвилі:

$$E_0 = \frac{qA}{4\pi\epsilon_0 rc^2} \omega^2.$$

2.3. Закони і закономірності розділу

ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Закон збереження електричного заряду

Надлишок електронів на одному тілі робить його негативно зарядженим, недостача їх на другому тілі робить його в цілому позитивно зарядженим. Негативний заряд одного тіла точно дорівнює за величиною позитивному заряду другого тіла. Це положення відоме під назвою закону збереження електричного заряду: *електричні заряди не виникають і не зникають, вони можуть лише передаватися від одного тіла до іншого або переміщуватися всередині даного тіла.*

$$q_1 + q_2 + \dots + q_N = \text{const}; \sum_{i=1}^N q_i = \text{const}.$$

Алгебраїчна сума зарядів, які виникають у будь-якому електричному процесі на всіх тілах, що беруть участь у цьому процесі, завжди дорівнює нулю.

Іншими словами: *в ізолюваній системі алгебраїчна сума всіх зарядів зберігається при будь-яких змінах всередині системи.*

Ізолюваною називається система, яка не обмінюється зарядами із зовнішнім середовищем.

Наелектризовані різнойменно заряджені тіла - притягуються, а однойменно – відштовхуються.

Закон Кулона

Кулон встановив такий закон: *сили взаємодії двох точкових заряджених тіл прямо пропорційні добутку величини їх зарядів, обернено пропорційні квадратів відстані між ними, залежать від середовища і напрямлені вздовж лінії до центрів тіл.*

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від вибору системи одиниць; ϵ - відносна діелектрична проникність середовища – число, яке показує, у скільки разів сила взаємодії будь-яких зарядів у даному середовищі менша, ніж у вакуумі.

Інколи, щоб підкреслити, що q_1 і q_2 - модулі зарядів, то формула закону Кулона прийме вигляд:

$$F_{12} = k \frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2}.$$

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F},$$

де F_0 - сила взаємодії у вакуумі; F - сила взаємодії у даному середовищі.

Для вакууму $\varepsilon = 1$, для іншого середовища діелектрична проникність більше одиниці.

Одиницею сили є *ньютон*, одиницею відстані – *метр*, одиницею заряду – *кулон*.

Коефіцієнт пропорційності у законі Кулона в одиницях СІ:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0},$$

ε_0 - діелектрична стала.

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}, \text{ або } \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}.$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

Ця величина означає, що *два точкових (які знаходяться в спокої) електричних зарядів по 1 Кл кожний, розташовані у вакуумі на відстані 1 м один від одного, взаємодіють один з одним з великою силою $9 \cdot 10^9$ Н*. Відповідно, заряд 1 Кл - дуже великий заряд.

Закон Кулона в СІ набуває такого вигляду:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2};$$

Принцип суперпозиції сил

Якщо на заряд діють сили зі сторони декількох зарядів, то їх рівнодійна визначається за правилом векторного складання сил. Це правило називається *принципом суперпозиції сил*.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N, \text{ або } \vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i,$$

де $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_N$ - напруженості полів, які створюються окремими зарядами в даній точці простору.

Принцип суперпозиції сил при взаємодії декількох зарядів: *рівнодійна сил, що діє на даний заряд зі сторони інших зарядів, дорівнює векторній сумі сил, які діють на цей заряд зі сторони кожного заряду окремо*.

Принцип суперпозиції полів:

Напруженість результуючого поля системи точкових нерухомих

зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створених кожним із цих зарядів окремо, тобто

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N, \text{ або } \vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i,$$

де $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_N$ - напруженості полів, які створюються окремими зарядами в даній точці простору.

Напруженість результуючого електричного поля системи точкових заряджених тіл визначається векторною сумою напруженостей полів окремих заряджених тіл. Цей висновок називають принципом незалежності дії електричних полів, принципом накладання, або суперпозиції.

Результуюча напруженість поля у довільній точці поля двох нерухомих зарядів, які лежать в одній площині:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha}.$$

Теорема Гаусса

Теорема Гаусса пов'язує потік вектора напруженості (або вектора індукції) електростатичного поля крізь довільну замкнену поверхню із зарядом, який охоплюється цією поверхнею.

Теорема Гаусса для потоку вектора напруженості електричного поля читається так: *потік вектора напруженості через будь-яку замкнену поверхню, яка оточує електричні заряди, дорівнює*

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \sum_{i=1}^N q_i$$

Інакше: *потік вектора напруженості скрізь замкнуту поверхню прямо пропорційний алгебраїчній сумі електричних зарядів, розташованих всередині цієї поверхні.*

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \oint_S E_n dS = q.$$

Формула для обрахунку потоку вектора індукції електростатичного поля має вигляд:

$$\Phi_D = \sum_{i=1}^N q_i; \quad \Phi_D = \oint_S D_n dS = q.$$

Повний потік вектора електричної індукції через довільну замкнену поверхню чисельно дорівнює алгебраїчній сумі електричних зарядів тіл, які містяться всередині цієї поверхні. У цьому полягає суть теореми Гаусса.

Із цієї теореми випливає, що, якщо всередині замкнутої поверхні заряди є, але їх алгебраїчна сума дорівнює нулю, то потік вектора напруженості (індукції) скрізь цю поверхню, як і у випадку відсутності всередині неї зарядів, дорівнює нулю.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Закон Ома для ділянки кола

Ділянка кола, що не містить джерела струму називається *однорідною*.

Залежність сили струму від напруги на кінцях ділянки кола та опору цієї ділянки називається *законом Ома*.

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

Закон Ома читається так: *сила струму в ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки і обернено пропорційна його опору*.

Диференціальна форма запису закону Ома для ділянки кола

Закон, що виражає зв'язок густини струму j з напруженістю електричного поля E , називається *законом Ома і диференціальній формі* (так як густина струму – величина диференціальна).

$$j = \frac{1}{\rho} E,$$

де j - густина струму; ρ - питомий опір; E - напруженість електричного поля в провіднику.

Густина струму на ділянці кола прямо пропорційна напруженості електричного поля всередині цієї ділянки.

$$j = \sigma E,$$

де σ - питома електропровідність.

Закон Джоуля-Ленца

Кількість тепла Q , що виділяється в провіднику на ділянці кола, прямо пропорційна квадрату величини струму I^2 , опорі провідника R і часу проходження струму t

$$Q = I^2 R t.$$

Інший вигляд:

$$Q = \frac{U^2 t}{R}, \text{ або } Q = I U t.$$

Кількість теплоти в СІ так як і робота вимірюється у *джоулях*: [Дж].

Закон Джоуля-Ленца виражає величину енергії джерела, яка перетворюється у внутрішню енергію провідника.

Закон Ома для неоднорідної ділянки кола

Закон Ома для неоднорідної ділянки у якому невраховано опір джерела струму:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \xi}{R_{\text{заг}}}.$$

Закон Ома для неоднорідної ділянки у якому враховано опір джерела

струму r :

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \xi}{R + r}.$$

Сила струму в неоднорідній ділянці кола прямо пропорційна сумі різниці потенціалів на її кінцях і діючій на ній ЕРС і обернено пропорційна опорі ділянки.

Закон Ома для повного кола

Вираз закону Ома для повного кола:

$$I = \frac{\xi}{R + r},$$

де R - опір споживачів струму (зовнішній опір), r - опір джерела струму (внутрішній опір); $R + r$ - повний опір кола.

Сила струму в колі прямо пропорційна ЕРС джерела струму і обернено пропорційна сумі опорів зовнішньої і внутрішньої ділянки кола.

Інший вигляд:

$$\xi = IR + Ir.$$

Якщо

$$U = IR$$

спад напруги в зовнішньому колі з опором R , то

$$U = \xi - Ir,$$

де Ir - спад напруги всередині джерела струму.

Формула закону Ома для повного кола з N послідовно з'єднаних однакових джерел:

$$I = \frac{N\xi}{R + Nr}.$$

Формула закону Ома для повного кола з N паралельно з'єднаних однакових джерел:

$$I = \frac{N}{R + \frac{r}{N}}.$$

На законах послідовного і паралельного з'єднання провідників заснована вся технологія освітлювальних мереж й інших розділів електротехніки.

Послідовне з'єднання провідників

При послідовному з'єднанні опорів сила струму I , який проходить по колу, дорівнює силі струмів, що проходять крізь окремих опір:

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_N.$$

Спад напруги U на всій ділянці кола дорівнює сумі спадів напруг на кожному опорі:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N; U = \sum_{i=1}^N U_i.$$

Опір зовнішнього кола R дорівнює сумі окремих опорів:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N; \quad R = \sum_{i=1}^N R_i.$$

Якщо всі N провідників мають однаковий опір R , то

$$U = NU' \text{ і } R = R'N.$$

Напруга на двох послідовно з'єднаних провідниках прямо пропорційні опорам цих провідників:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Паралельне з'єднання провідників

При паралельному з'єднанні опорів сила струму I в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів у кожному окремому опорі:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N; \quad I = \sum_{i=1}^N I_i$$

Спад напруги на всій ділянці кола дорівнює спадам напруги на кожному окремому опорі:

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_N.$$

Величина обернена повному опорі R , дорівнює сумі величин, обернених опорам паралельних ділянок:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}; \quad \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}.$$

Загальний опір N паралельно з'єднаних однакових провідників в N разів менший опору кожного з них:

$$R = \frac{R'}{N}.$$

При паралельному з'єднанні будь-якої кількості провідників їх загальний опір завжди буде меншим від меншого опору цих провідників.

Сили струмів у двох паралельно з'єднаних провідниках обернено пропорційні опорам цих провідників:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Загальна провідність паралельно з'єднаних провідників дорівнює сумі провідностей кожного провідника:

$$k = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_N; \quad k = \sum_{i=1}^N k_i.$$

Правила Кірхгофа

На практиці досить часто зустрічаються складні мережі струмів, споживачів, різних вимірювальних приладів і пристроїв. Складні електричні кола розраховують, користуючись двома законами, або правилами, Кірхгофа.

Перше правило Кірхгофа стосується вузлових точок. Вузлом у

розгалуженому колі називається точка, в якій сходяться більш як два провідники.

Сума всіх струмів, які входять у точку розгалуження, дорівнює сумі струмів, які виходять з цієї точки, тобто

$$I_1 + I_3 + I_5 = I_2 + I_4.$$

Якщо струми, які підходять до вузла, вважати додатними, а струми, що виходять – від'ємними, то

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

де n - кількість провідників із струмами у вузлі, I_k - струми в них.

Перше правило Кірхгофа можна сформулювати ще так: *алгебраїчна сума величин усіх струмів у кожній точці розгалуження дорівнює нулю.*

Друге правило Кірхгофа стосується замкнутого контуру. У загальному вигляді для всякого замкнутого контуру

$$\sum_{k=1}^m I_k R_k = \sum_{i=1}^n E_i,$$

де m - кількість ділянок у замкнутому контурі, n - кількість включених у ньому джерел.

Друге правило Кірхгофа можна сформулювати так: *у будь-якому замкнутому контурі, довільно вибраному в розгалуженому електричному колі, алгебраїчна сума добутків величин струмів I_k на опори R_k відповідних ділянок дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють у цьому контурі.*

Оскільки $I_k R_k = U_k$ - напруга на k -й ділянці, то друге правило Кірхгофа можна сформулювати ще так: *алгебраїчна сума напруг на всіх ділянках замкнутого контуру дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють у цьому контурі.*

Правила Кірхгофа придатні й для змінних струмів малої частоти (квазістаціонарних струмів).

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩ

Закони Вольта

1. Контактна різниця потенціалів залежить від природи контактуючих металів і температури спаю.

2. Контактна різниця на кінцях ланцюжка різнорідних металів не залежить від природи проміжних ланок і визначається тільки крайніми металами.

Закони електролізу

М. Фарадей експериментально встановив у 1834 р. два закони електролізу.

Перший закон: *маса речовини, яка виділяється на кожному з*

електродів, пропорційна величині заряду, що проходить через електроліт:

$$m = kq,$$

де k - електрохімічний еквівалент речовини, що чисельно рівний масі речовини, яка виділяється на катоді при проходженні через електроліт одиниці заряду:

$$k = \frac{m}{q}.$$

Електрохімічний еквівалент – скалярна додатна величина. Одиниця електрохімічного еквіваленту в СІ – кілограм на кулон: $\left[\frac{кг}{Кл} \right] \cdot 1 \frac{кг}{Кл}$ - це маса речовини, що виділяється на електроді при проходженні через електроліт заряду в 1 Кл.

Якщо прийняти, що $q = It$, то

$$m = kIt.$$

Інше формулювання першого закону: маса речовини, що виділяється на електроді при електролізі, прямо пропорційна силі струму в електроліті і часу його проходження.

$$m = \frac{A}{N_A Z e} q; m = \frac{A}{N_A Z e} It.$$

Другий закон: електрохімічний еквівалент речовини прямо пропорційний хімічному еквіваленту даної речовини.

$$k = C \frac{A}{Z},$$

де C - універсальна стала для всіх елементів; $\frac{A}{Z}$ - хімічний еквівалент речовини, безрозмірна величина, що чисельно дорівнює відношенню атомної маси до валентності; Z - валентність.

$$k = \frac{A}{N_A Z e}.$$

Обернена величина до сталої $\frac{1}{C} = F$, тоді $k = \frac{1}{F} \frac{A}{Z}$.

Об'єднаний закон Фарадея:

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{Z} q, \text{ або } m = \frac{1}{F} \frac{A}{Z} It.$$

Маса речовини, що виділилася на електроді при електролізі, прямо пропорційна атомній масі цієї речовини, силі струму в електроліті, часу електролізу і обернено пропорційна валентності цієї речовини.

Відношення молярної маси речовини M (атомної маси A) до його валентності Z в електрохімії називають хімічним еквівалентом речовини χ

$$\chi = \frac{A}{Z}; \quad \chi = \frac{M}{Z}.$$

Електрохімічні еквіваленти речовин, що виділилися на електроді при електролізі, прямо пропорційні їх хімічним еквівалентам. Або відношення електрохімічного еквівалента речовини до його хімічного еквівалента є величина стала для всіх речовин.

$$\frac{k_1}{\chi_1} = \frac{k_2}{\chi_2}$$

Якщо прийняти, що стала величина

$$C = \frac{1}{eN_A},$$

де e - заряд електрона; N_A - стала Авогадро,
то

$$F = eN_A.$$

Стала Фарадея (F) чисельно дорівнює електричному заряду, який треба пропустити через електроліт для виділення на електроді маси будь-якої речовини, що дорівнює в кілограмах відношенню $\frac{A}{Z}$.

$$F = 9,648 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}.$$

МАГНІТНІ ЯВИЩА

Закон Біо-Савара-Лапласа

Елементарний вектор магнітної індукції, зв'язаний з нескінченно малим елементом струму, прямо пропорційний величині цього елемента (Idl), синуса кута між дотичною до елемента струму і напрямком на дану точку поля та обернено пропорційний квадрату відстані від елемента струму до даної точки:

$$d\vec{B} = k \frac{Idl \sin(\vec{dl}, \vec{r})}{r^2},$$

де r - модуль радіуса-вектора, проведеного від елемента провідника dl до точки; (\vec{dl}, \vec{r}) - кут між вектором dl (у напрямі струму) і вектором \vec{r} ; k - коефіцієнт пропорційності, який залежить від вибору одиниць B, I, l, r і властивостей середовища, в якому локалізоване магнітне поле - $k = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi}$.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Idl \sin(dl, r)}{r^2}.$$

Закон Ампера

Два прямі паралельні струму притягуються, а антипаралельні

відштовхуються; непаралельні струми намагаються стати паралельними в одному напрямі. Це стосується і двох колових струмів.

Тобто *паралельні прямі провідники з струмами, що течуть в одному напрямі, притягуються один до одного під дією сил зі сторони магнітних полів, що оточують ці провідники; паралельні прямі провідники з струмами, що течуть антипаралельно один до одного, відштовхуються під дією сил, прикладених до них зі сторони магнітних полів цих струмів.*

Для двох нескінченно довгих паралельних провідників із струмами:

$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi R}; \quad B_2 = \frac{\mu_0 \mu I_2}{2\pi R},$$

де I_1, I_2 - сили струмів відповідно першого і другого провідників; R - відстань між провідниками.

Сила Ампера, між двома паралельними провідниками із струмами:

$$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi R} l.$$

Сила, з якою два паралельних прямих нескінченно довгих провідники з струмами діють один на одного під дією оточуючих їх магнітних полів, прямо пропорційна добутку сил струмів в них, довжині ділянки, на яку діє ця сила, і обернено пропорційна відстані між провідниками.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Закон електромагнітної індукції

Закон Фарадея для електромагнітної індукції: *ЕРС електромагнітної індукції, що виникає в контурі при будь-якій зміні магнітного потоку, перетинаю чого цей контур, дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, взятого зі знаком мінус:*

$$\xi_i = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1}, \text{ або } \xi_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

де Φ_1 і Φ_2 - магнітні потоки через площу, обмежену контуром у моменти часу t_1 і t_2 ; $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ - швидкість зміни магнітного потоку, тобто зміна магнітного потоку за одиницю часу.

Якщо магнітне поле неоднорідне, то при довільній зміні магнітного потоку скрізь контур ЕРС індукції дорівнює першій похідній магнітного потоку по часу, взятої із знаком мінус:

$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \text{ або } \xi_i = -\Phi'.$$

Закон електромагнітної індукції: *ЕРС індукції в замкнутому контурі дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром.*

Якщо контур, що перетинається змінним магнітним потоком, містить

не один, а N витків, то

$$\xi_i = -N \frac{d\Phi}{dt}, \text{ або } \xi_i = -N\Phi'.$$

Закон самоіндукції

Закон електромагнітної індукції Фарадея для явища самоіндукції:

$$\xi_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; \quad \xi_c = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі при зміні струму в ньому, прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в контурі, взятої із знаком «мінус»:

$$\xi_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

де $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ - швидкість зміни сили струму, тобто зміна сили струму за одиницю часу.

Миттєва ЕРС самоіндукції прямо пропорційна першій похідній сили струму по часу, взятої із знаком «мінус»:

$$\xi_c = -L \frac{dI}{dt}; \quad \xi_c = -LI'.$$

ЗМІННИЙ СТРУМ

Закон Ома для змінного струму:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}}; \quad I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

де $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ - повний опір кола; R - активна складова опору Z ;

$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ - відповідно реактивна складова опору Z .

Повний опір кола (з складових активного та реактивного опору) називають *імпедансом*.

$$I_0 = \frac{U_0}{Z}.$$

Співвідношення справедливе для амплітудних або ефективних значень струму і напруги, але не для їх миттєвих значень. А також даний вираз справедливий для повного кола, в якому діє змінна ЕРС.

Значення Z не є сталим, воно залежить від частоти струму.

3. Задачі з загальної фізики, методичні рекомендації для їх аналізу і розв'язування

Розв'язування задач є одним з основних видів діяльності студентів при вивченні розділу «Електрика і магнетизм». При розв'язуванні задач, так само як і при виконанні лабораторних робіт, можна максимально індивідуалізувати процес навчання, що практично недосяжно при читанні лекцій. Фізичні задачі та вправи бувають надзвичайно корисними для постановки ряду проблем, перевірки якості засвоєння матеріалу, повторення та узагальнення матеріалу, формуванні практичних умінь, розвитку творчих здібностей студентів тощо.

Задачі з фізики поділяють на експериментальні, графічні та текстові, які в свою чергу поділяються на розрахункові та якісні. Найбільш поширений вид задач - текстові.

Процес розв'язування фізичних задач становить собою пошук засобів виходу з практичних, реальних складних умов, процес досягнення мети, яка з першого погляду здається недосяжною.

Ця діяльність обумовлена особливістю інтелекту, що є наданням навчально-пізнавальної об'єктивної реальності, діяльності людини. Розв'язування задачі таке ж вміння як плавати, кататися на лижах чи ковзанах, грати на музичному інструменті. Навчитись розв'язувати задачі можна лише при глибокому розумінні теоретичних основ науки, наслідуючи кращі приклади методичних підходів та постійно тренуючись. Усі дії при розв'язуванні задачі повинні нагадувати виконання певного алгоритму. Він може бути різним для кожної особистості. Проте є певні загальні підходи. А тому необхідно:

- уважно прочитати умову задачі та зробити короткий запис. При цьому всі числові значення величин повинні бути виражені в основних одиницях міжнародної системи одиниць (SI). Бажано скорочено записати її словесні характеристики. Наприклад: «у стані спокою» $=const$; «рухається рівноприскорено» - $a=const$; «опором елемента знехтувати» - $R=0$ тощо. Сюди ж треба вписати необхідні табличні дані та, якщо необхідно, значення фундаментальних констант - швидкість поширення світла, заряд і маса електрона, стала Планка, електрична та магнітна сталі та інші.

- зробити малюнок або схему, які мають бути точними, у будь-якій проекції, без значних спотворень пропорцій та кутів, у зручному масштабі. На рисунку або схемі проставити вказані в умові величини, позначити знаки зарядів, напрями струмів, рухів, прискорень, діючих сил, тощо.

- поставити перед собою запитання: «Що відбувається?», «Яке явище, процес має місце?». Відповіді на ці питання мають бути виділенням найбільш важливого, головного з фізичної точки зору. Після формулювання відповіді на ці запитання знайти відповідь на питання:

«Чому це явище (цей процес, ця ситуація) відбувається?». Відповідь на це питання потрібно записати в математичному вигляді. Це може бути один із законів фізики, співвідношення балансу енергії або інших величин (математичний запис результату експерименту, функціональний зв'язок між величинами) тощо.

- після математичного запису основної ідеї, яка визначає стан або процес, описаний в умові, потрібно з'ясувати яку величину необхідно знайти («Що невідомо?») і, якщо це зразу можливо, виразити її узагальненою формулою. Далі з'ясувати які величини невідомі та намітити план подальшої роботи по їх відшукуванню. При цьому корисно питати себе: «Що ще невідомо?», «Яке положення умови ще не використано?» тощо.

- довести розв'язок до кінця у загальному вигляді. Перевірити одиниці шуканої величини. Для цього у праву частину одержаної формули потрібно підставити основні одиниці даних величин і шляхом перетворень та скорочень переконатись у правильності розмірності отриманої величини.

- провести обчислення та записати остаточну відповідь. Результат обчислень може бути наближеним. Тоді можна скористатися відомим правилом: значення відповіді повинно включати на одну значущу цифру більше, ніж у вихідних даних.

- після того як дістали числове значення шуканої величини, потрібно оцінити правильність (реальність) цього значення. Для цього дати собі відповідь на запитання: «Чи може таке значення бути?» Всі задачі фізики пов'язані з станами та процесами об'єктивної реальності, тому всі значення які дістають при розв'язуванні задач повинні бути реальними. Не може маса Землі дорівнювати $5 \cdot 10 \text{ кг}$, а швидкість світла $2 \cdot 10^{15} \text{ м/с}$, напруженість поля в конденсаторі $3 \cdot 10^{12} \text{ В/м}$, а ємність провідної кулі 10 Ф тощо. Для оцінки подібних значень можна порівняти їх з відомими табличними або досить поширеними - густина, діелектрична проникність води, електропровідність міді, швидкість поширення світла у вакуумі, ємність Землі і таке інше. Це не є абсолютним і обов'язковим методом. У кожного можуть бути особисті методи та прийоми оцінки значень фізичних величин, своя інформація. До такого аналізу необхідно готуватись і виконувати його при розв'язуванні не лише фізичних задач.

- в окремих фізичних задачах потрібно графічно зображати певні залежності між величинами. Слід пам'ятати, що в конкретній задачі ця графічна залежність має бути не «взагалі», а конкретно відповідати умові даної задачі. При цьому знову слід пам'ятати, що всі графічні залежності відповідають реальним процесам. Не може, наприклад, графік координати рухомої матеріальної точки мати розрив або злам. Бо розрив означав би нескінченну за значенням швидкість, а злам - нескінченно велике прискорення в даний момент.

3.1. Змістовий модуль № 1. Електрика

3.1.1. Електростатика

3.1.1.1. Вказівки до розв'язку задач з електростатики

Основне завдання, яке ставиться при розв'язку задач з електростатики полягає у встановленні основних характеристик поля - E , D , φ в залежності від розташування зарядів, їх кількості, властивостей середовища, а також у з'ясуванні особливостей взаємодії електричних зарядів і полів та електричних зарядів між собою.

Типові задачі даного розділу можуть бути об'єднані в такі основні групи:

1. Обчислення сил взаємодії між зарядженими тілами, розміщеними в одній площині та просторово розміщених.
2. Визначення напруженості електричного поля, яке створене одним зарядом або системою зарядів.
3. Визначення потенціалу електричного поля.
4. Задачі, в яких сили взаємодії і параметри електричного поля обумовлені розподілом зарядів вздовж ізольованого провідника заданої форми і розмірів.
5. Визначення силових та енергетичних параметрів при внесенні провідників чи діелектриків в електричне поле.

При розв'язуванні кожної групи задач використовуються загальні для цієї групи задач способи, фізичні закономірності.

- Так при розв'язуванні задач, що увійшли до першої групи, слід пам'ятати, що силу взаємодії між точковими зарядами обчислюють за законом Кулона. При цьому враховують:

- а) що сила, з якою діє кожен точковий заряд, є величина векторна;
- б) взаємодія декількох зарядів підлягає принципу суперпозиції;
- в) якщо лінійні розміри заряджених тіл співрозмірні, або більші відстані взаємодії, чи в інших складних випадках, коли утруднений перехід до уявлень про точкові заряди, тоді силу взаємодії між зарядженими тілами краще обчислювати за формулою $F=E \cdot q$, де E - напруженість поля, яке створене усіма зарядами (окрім заряду q) в точці розміщення заряду q .

- При розв'язуванні задач, які віднесені до другої групи, виходимо з того, що потрібно визначити напруженість поля, що створене системою зарядів. Їх можна розв'язати, в основному, двома способами:

- а) обчислюючи напруженість поля точкового заряду з використанням принципу суперпозиції; б) за допомогою теореми Остроградського-Гаусса;

Застосовуючи перший спосіб до таких задач, в яких заряди розподілені по поверхні чи об'єму тіла, їх розбивають на елементарні заряди, до яких застосовують формули напруженості поля точкового заряду. При цьому використовується принцип суперпозиції полів створених різними зарядами. Тобто, напруженість результуючого поля, яке створене двома

елементарними зарядами q_1 і q_2 , що знаходяться на певній відстані один від одного, визначається як векторна сума напруженостей кожного заряду в даній точці окремо:

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i$$

Якщо елементарних зарядів багато, то інтегруванням напруженостей полів елементарних зарядів визначають сумарну напруженість, яка створена зарядженим тілом, пам'ятаючи, що потрібно сумувати тільки ті складові напруженостей елементарних зарядів, які співпадають з напрямком результуючого вектора напруженості поля, створеного всіма зарядами тіла.

Інтегральною формулою теореми Остроградського-Гаусса зручно користуватись тоді, коли з міркувань симетрії можна вибрати поверхню правильної геометричної форми, яка б охоплювала заряди, вказати напрям ліній напруженості. Вибираючи поверхню, що охоплює заряди, слід пам'ятати, що величини напруженості поля в кожній точці поверхні мають бути однакові.

- Якщо індукція і напруженість електричного поля є векторними величинами, і дії по їх визначенню підлягають правилам векторної алгебри, то інша, не менш важлива енергетична характеристика поля - *потенціал* φ - є скалярною величиною. Для визначення потенціалу поля можливі два методи.

- Якщо поле утворене системою довільно розміщених точкових зарядів, то в будь - якій точці простору потенціал поля системи визначається *алгебраїчною сумою* потенціалів полів, створених окремо взятими зарядами.

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i$$

Цей метод розрахунку потенціалу може бути застосований і тоді, коли заряд неперервно розподілений у просторі, тобто для будь - якого зарядженого тіла.

- Але такий метод розрахунку потенціалу для точок поля, що утворене нескінченною зарядженою ниткою чи пластиною, приведе до значення потенціалу, що дорівнює нескінченності. Тобто, результат не має фізичного змісту. В такому випадку користуються формулою, що встановлює зв'язок між напруженістю поля і градієнтом потенціалу

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi$$

У цьому випадку, інтегруючи вираз $\varphi = -\int E dl$, можна знайти різницю потенціалів між точками на скінченних відстанях від джерела поля, де напруженість поля визначається з достатньою практичною точністю.

Отже, якщо існує вираз для напруженості поля будь-якої системи зарядів, то інтегруванням його у відповідних межах можна визначити значення потенціалу цього поля.

• При розв'язуванні задач, що віднесені до четвертої групи, слід пам'ятати, що

а) умовою електростатичної рівноваги на провіднику є рівність нулю напруженості електростатичного поля в середині провідника;

б) вектор напруженості в будь-якій точці поверхні провідника перпендикулярний до неї, а значення потенціалу має бути однакове в усіх точках провідника. Поверхня з таким значенням потенціалу є *еквіпотенціальною*.

Отже, задачі по визначенню розподілу заряду на поверхні ізолюваного провідника є задачами по визначенню розподілу густини зарядів на елементах поверхні провідника, якщо в середині провідника в усіх точках потенціал має однакове значення. При цьому формула для визначення потенціалу має вигляд

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int \frac{\sigma dS}{r}$$

де r - відстань від точки з зазначеним потенціалом до поверхні

• При розв'язуванні задач, що віднесені до п'ятої групи, слід мати на увазі:

а) фізичні процеси і закономірності у внесених в електричне поле провідниках обумовлені наявністю вільних зарядів, а в діелектриках - наявністю зв'язаних зарядів, тобто в провіднику відбуваються перерозподіл зарядів на поверхні, а діелектрик поляризується;

б) напруженість поля всередині провідника дорівнює нулеві $E=0$.

в) існує зв'язок між поверхневою густиною зв'язаних зарядів на межі діелектрик-провідник і густиною вільних зарядів на провіднику:

$$\sigma' = \sigma \frac{\epsilon - 1}{\epsilon}$$

г) силові лінії на межі двох ізотропних діелектриків заломлюються;

д) провідники можуть бути заземлені і ізолювані.

3.1.1.2. Практичні заняття

Практичне заняття № 1.

ВЗАЄМОДІЯ ТОЧКОВИХ ЗАРЯДІВ. ЗАКОН КУЛОНА.

1. За теорією Бора електрон рухається в атомі водню навколо ядра по коловій орбіті радіуса $R=0,53 \text{ \AA}$. Визначити швидкість обертання електрону.

2. Дві мідні кульки діаметром $d=10 \text{ мм}$ на тонких нерозтяжних нитках підвішені так, що вони торкаються одна до одної. Після того, як кульки

зарядили до величин q , відстань між ними стала рівною $r=4$ см. Визначити величину заряду q , якщо довжина нитки $l=26$ см.

3. У вершинах правильного шестикутника знаходяться позитивні заряди $+q$. Сторона шестикутника a . Визначити величину заряду який необхідно помістити у центр фігури для зрівноваження дії всіх шістьох зарядів $+q$.

4. Визначити силу взаємодії двох молекул води, електричні моменти яких рівні p і розташовані вздовж однієї прямої. Відстань між молекулами r .

5. По тонкій нитці довжиною $l=8$ см рівномірно розподілено заряд $q_1=350$ мкКл, що діє з силою $F=120$ мкН на точковий заряд що знаходиться на продовженні тієї ж нитки на відстані $r=6$ см від її середини. Визначити величину заряду якщо система знаходиться в повітрі.

Практичне заняття № 2.

НАПРУЖЕНІСТЬ ПОЛЯ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦІЇ.

1. Два точкових заряди $q_1=2\cdot 10^{-7}$ Кл та $q_2=-4\cdot 10^{-7}$ Кл знаходяться в діелектрику з $\epsilon=2$ на відстані $d=10$ см один від одного. Визначити напруженість електричного поля в точці А, що знаходиться на відстані $r_1=20$ см від першого та $r_2=15$ см від другого зарядів.

2. Тонке кільце радіусом $R=8$ см несе заряд, рівномірно розподілений з лінійною густиною. Знайти напруженість електричного поля в точці рівновіддаленій від всіх точок кільця на відстань $r=10$ см.

3. Тонка нитка рівномірно заряджена зарядом $q=6\cdot 10^{-8}$ Кл. Визначити напруженість поля в точці, яка міститься на відстані $l=5\cdot 10^{-2}$ м від центра нитки і на $l=0,6$ м від її кінців.

4. Провідник у вигляді півкола радіусом $R=0,9$ м рівномірно заряджений зарядом $q=5$ нКл. Визначити напруженість поля у центрі цієї фігури.

5. Диск радіусом $R=0,2$ м заряджено рівномірно з поверхневою густиною $\sigma=8,85\cdot 10^{-7}$ Кл/м². Визначити напруженість поля в точці на перпендикулярі, що проходить через центр диска, і розміщена на відстані $h=0,2$ м від нього.

Практичне заняття № 3.

НАПРУЖЕНІСТЬ ПОЛЯ. ТЕОРЕМА ГАУССА.

1. З якою силою F_z на одиницю площі відштовхується дві однойменно заряджені нескінченні пластини розташовані паралельно у вакуумі. Поверхнева густина заряду на пластинах $\sigma=0,3$ мКл/м².

2. Дві довгі тонкостінні коаксіальні трубки радіусів $R_1=2$ см та $R_2=4$ см несуть заряди, рівномірно розподілені по довжині з лінійними густинами $\tau_1=10^{-3}$ мкКл/м та $\tau_2=-5\cdot 10^{-4}$ мкКл/м. Простір між трубками заповнено

ізолятором з діелектричною проникністю $\epsilon=3$. Визначити напруженість поля в точках, які знаходяться на відстані 1, 3 та 5 см від спільної осі трубок. Намалювати схематично графік залежності напруженості поля від відстані до осі трубок.

3. Три металеві пластини розташовані на відстані l_1 та l_2 одна від одної. На першій пластині знаходиться заряд $+q$. Дві незаряджені пластини закорочені між собою. Визначити силу, яка діє на другу пластину, якщо площі всіх пластин однакові та рівні S .

4. Визначити напруженість поля від двох нескінченних коаксіальних циліндрів в точках, що віддалені від осі на 10 і 20 мм, якщо радіус внутрішнього циліндра 9 мм, а зовнішнього 12 мм. Густина зарядів на поверхні внутрішнього циліндру $\sigma_1=2 \cdot 10^{-3}$ Кл/м², зовнішнього $\sigma_2=4 \cdot 10^{-3}$ Кл/м².

5. Точковий заряд $q=50$ нКл знаходиться на осі прямого колового циліндру на відстані 5 см від основи. Знайти число силових ліній, які проходять через його бічну поверхню, якщо висота циліндру $h=10$ см, а радіус основи $r=5$ см.

Практичне заняття № 4.

ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.

1. До якої відстані можуть наблизитись два електрони, які рухаються назустріч один одному з відносною швидкістю $v_0=10^6$ м/с?

2. Поле створено електричним зарядом, рівномірно розподіленим по довгому циліндру радіусом $R=1$ см з лінійною густиною заряду $\tau=20$ нКл/м. Визначити різницю потенціалів двох точок цього поля, що знаходяться на відстанях $a_1=0,5$ см та $a_2=2$ см від поверхні циліндру в середній його частині.

3. Кільце тонкого дроту рівномірно заряджене зарядом $q=2 \cdot 10^{-8}$ Кл. Радіус кільця $R=3$ см. Визначити потенціал поля на перпендикулярі до площини кільця на відстані $h=4$ см від неї та в центрі кільця.

4. Визначити потенціал поля в точці осі диполя на відстані r від центра диполя, якщо електричний момент його дорівнює p , а плече - l .

5. Дві металеві кульки радіусами $R_1=8$ см та $R_2=18$ см зарядили однойменними зарядами $q_1=13$ нКл та $q_2=18$ нКл відповідно. Знайти величину зарядів кульок після їх з'єднання.

Практичне заняття № 5.

ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. КОНДЕНСАТОРИ. З'ЄДНАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ.

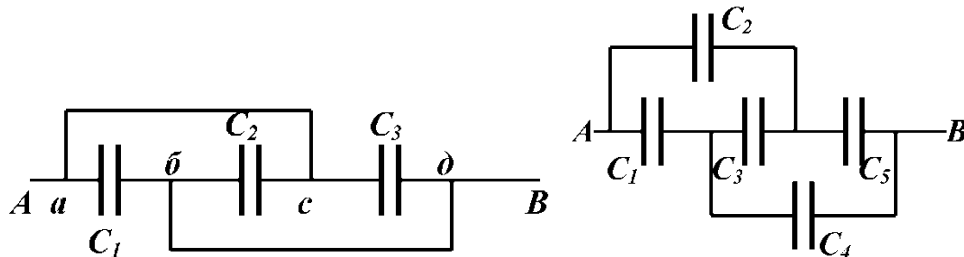
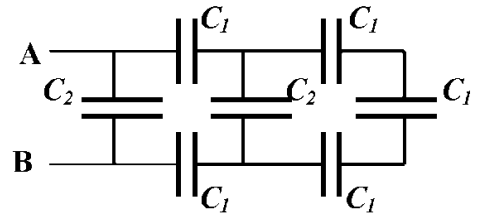
1. Плоский конденсатор заповнений трьома шарами діелектриків: склом товщиною $d_1=0,35$ см ($\epsilon_1=7$), парафіном з $d_2=0,21$ см ($\epsilon_2=2,1$) і

фабором $d_3=0,9$ см ($\epsilon_3=4,5$). Визначити напруженість поля в кожному діелектрику 10 кВ.

2. Між пластинами плоского конденсатора паралельно до них введена металева пластинка товщиною $d=8,0$ мм. Визначити ємність конденсатора, якщо площа кожної з пластини $S=100$ см², а відстань між ними $l=10,0$ мм.

3. Обчислити загальну ємність системи конденсаторів ємністю C_1 та C_2 .

4. Обчислити ємність системи однакових конденсаторів ємністю C між точками A та B , зображених на схемі 1 та схемі 2



5. Конденсатор $C_1=20$ мкФ зарядили до різниці потенціалів $U_1=40$ В, а конденсатор $C_2=12$ мкФ зарядили до різниці потенціалів $U_2=12$ В. Після відключення їх з'єднали різноіменними обкладками. Чому стала рівною різниця потенціалів, яка установилась на конденсаторах після з'єднання?

Практичне заняття № 6.

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ В ДІЕЛЕКТРИКАХ. ЕНЕРГІЯ ТА ГУСТИНА ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.

1. Між пластинами плоского конденсатора знаходиться скляна пластинка ($\epsilon=7$), що торкається його пластин. Конденсатор зарядили до різниці потенціалів $U=100$ В. Якою буде різниця потенціалів, якщо витягти пластину з конденсатора?

2. Простір між пластинами конденсатора, відстань між якими дорівнює $d=4$ мм, заповнений слюдою ($\epsilon=6$). До пластин прикладена різниця потенціалів 1200 В. Визначити: 1) напруженість поля в діелектрику $-E$; 2) поверхневу густину вільних зарядів (зарядів на пластинах конденсатора) $-\sigma_0$; 3) поверхневу густину зв'язаних зарядів (зарядів на поверхні діелектрика) $-\sigma'$; 4) діелектричну сприйнятливість слюди $-\chi$.

3. Відстань між пластинами плоского конденсатора $d=2$ см, різниця потенціалів $U=6000$ В. Заряд кожної пластини $q=10^{-8}$ Кл. Обчислити енергію W поля конденсатора та силу F взаємного притягання пластин.

4. Конденсатор ємністю $C_1=700$ пФ зарядили до різниці потенціалів $U=1500$ В і відімкнули від джерела напруги. Після цього до нього приєднали другий незаряджений конденсатор ємністю $C_2=400$ пФ.

Яка кількість енергії, запасеної в першому конденсаторі, була використана на утворення іскри, що виникла при з'єднанні конденсаторів?

5. Визначити енергію диполя, який міститься в однорідному електростатичному полі напруженістю $E=3 \cdot 10^2$ В/м, якщо плече диполя утворює кут $\varphi=30^\circ$ з напрямом напруженості зовнішнього поля. Електричний момент диполя $p=4 \cdot 10^{-9}$ Кл/м.

3.1.1.3. Задачі для самостійного розв'язування з електростатики

Електростатичне поле у вакуумі

Закон взаємодії нерухомих точкових зарядів q_1 і q_2 (закон Кулона)

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r} \quad (1.1)$$

де r - радіус-вектор, проведений від одного заряду до іншого; F - сила, що діє на заряд, до якого напрямлений радіус-вектор r .

Напруженість електростатичного поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.2)$$

де F - сила, що діє на точковий позитивний заряд q , вміщений у дану точку поля.

Напруженість електростатичного поля точкового заряду q

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r} \quad (1.3)$$

де r - радіус-вектор, проведений від заряду в задану точку поля.

Принцип суперпозиції електростатичних полів

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i \quad (1.4)$$

Лінійна, поверхнева та об'ємна густини зарядів відповідно

$$\tau = \frac{dq}{dl}; \sigma = \frac{dq}{dS}; \rho = \frac{dq}{dV} \quad (1.5)$$

Напруженість електростатичного поля (за модулем):

а) точкового диполя з електричним моментом p_e

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e}{r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2\theta} \quad (1.6)$$

де $p_e=ql$ - плече диполя; θ - кут між електричним моментом диполя p_e і радіусом-вектором r , що визначає положення даної точки відносно центра диполя;

б) рівномірно зарядженої нескінченної нитки (або циліндра радіуса R) на відстані r від її осі (для $r \geq R$ - зовні циліндра)

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\tau}{r} \quad (1.7)$$

в) рівномірно зарядженої нескінченної площини

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (1.8)$$

г) сфери радіуса R , заряд q якої рівномірно розподілений по її поверхні, на відстані r від центра сфери

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (r \geq R) \quad (1.9)$$

д) сфери радіуса R , заряд q якої рівномірно розподілений по її об'єму, на відстані r від центра сфери

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R} r = \frac{r\rho}{3\epsilon_0} \quad (r \leq R) \\ E &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2} \quad (r \geq R) \end{aligned} \quad (1.10)$$

Потік вектора напруженості E крізь площадку dS

$$d\Phi_E = E dS = E_n dS \quad (1.11)$$

де dS - вектор, модуль якого дорівнює dS , а напрям збігається з нормаллю n до площини, $dS = dS_n$; E_n - проекція вектора E на додатну нормаль до площини dS . Потік вектора напруженості E крізь довільну поверхню S

$$\Phi_E = \int_S E dS = \int_S E_n dS \quad (1.12)$$

Електростатична теорема Гаусса

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i \quad (1.13)$$

де $\sum_{i=1}^N q_i$ - алгебраїчна сума зарядів усередині замкненої поверхні S .

Циркуляція вектора напруженості електростатичного поля

$$\oint_l E_l dl = 0 \quad (1.14)$$

де E_l - проекція вектора E на додатний напрям дотичної до замкненого контуру L .

Потенціал поля точкового заряду

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (1.15)$$

Потенціал поля, яке створюється системою зарядів

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (1.16)$$

Потенціал поля точкового диполя

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e r}{r^3} \quad (1.17)$$

Момент сил, що діють на диполь в однорідному електричному полі

$$M = [p_e E] \quad (1.18)$$

або

$$M = p_e E \sin \alpha \quad (1.19)$$

де α - кут між напрямками векторів p_e і E .

У випадку неоднорідного електричного поля, яке має симетрію відносно осі Ox , сила, що діє на диполь у такому полі

$$F_x = p \frac{\partial E}{\partial x} \cos \alpha \quad (1.20)$$

де $\frac{\partial E}{\partial x}$ – ступінь неоднорідності поля в напрямі O

Потенціальна енергія диполя в зовнішньому полі

$$W_n = -p_e E \quad (1.21)$$

Робота сил електростатичного поля під час переміщення заряду q з точки 1 у точку 2

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1.22)$$

Зв'язок між напруженістю E електростатичного поля й потенціалом φ :

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_l dl \quad (1.23)$$

Закон Кулона. Напруженість електричного поля точкового заряду. Сила, що діє на заряд в електричному полі

1. Якого заряду q набула б мідна куля, радіус якої $R=10$ см, якби вдалося забрати в неї всі електрони провідності? Вважати, що на кожний атом міді припадає один електрон провідності.

2. Визначити сумарний заряд q атомних ядер, які містяться в 1 м^3 міді.

3. Чому дорівнює сумарний заряд q одного моля електронів?

4. Порівняти силу кулонівської взаємодії F_c двох електронів із силою їх гравітаційної взаємодії F_g .

5. Якою мала б бути маса m'_p протона, для того щоб сила електростатичного відштовхування між двома протонами зрівноважилась силою їх гравітаційного притягання?

6. Який заряд q мають дві однаково заряджені краплини води, радіус яких $r_0=7,6 \cdot 10^{-5}$ м, якщо сила взаємного гравітаційного притягання їх зрівноважується силою кулонівського відштовхування? Краплини вважати матеріальними точками.

7. Діелектричне тіло, що має форму куба, заряджено однорідно з поверхневою густиною $\sigma=1$ мкКл/м². Якою буде поверхнева густина електричного заряду σ , якщо тіло привести в рух у напрямі одного з його ребер зі швидкістю $v=0,5$ с (с - швидкість світла у вакуумі)?

8. Дві однакові кульки, маса кожної $m=20$ мг, підвішені в повітрі на невагомих нерозтяжних непровідних нитках, що закріплені в одній точці підвісу і мають довжину $l=0,2$ м. Одну з кульок відвели вбік, надали їй заряду і потім відпустили. Після дотику з другою кулькою вони розійшлися так,

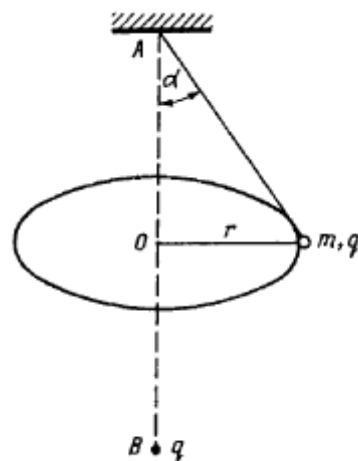


Рис. 3.1

що нитки утворили кут $\alpha=60^\circ$, Визначити модуль заряду q , який надали першій кульці.

9. Заряджена кулька, маса якої $m=10$ г, підвішена в повітрі в точці А на невагомій нерозтяжній непровідній нитці, що утворює кут $\alpha=45^\circ$ з вертикаллю, рухається з постійною кутовою швидкістю $\omega=10$ рад/с по колу радіуса $r=5$ см (рис. 3.1). У точці В міститься інша нерухома заряджена кулька. Визначити модулі зарядів кульок q , вважаючи їх однаковими за умови, що $AO=OB$.

10. Чому при визначенні напруженості електричного поля використовується малий пробний заряд?

11. Три однакових заряди ($q=0,1$ мкКл кожний) розміщені у вершинах рівностороннього трикутника. Який негативний заряд q_1 треба розмістити в центрі трикутника, щоб система перебувала в рівновазі? Чи буде ця рівновага стійкою?

12. Навколо нерухомого точкового заряду $q_0=+1$ нКл рівномірно обертається під дією сил притягання негативно заряджена маленька кулька. Чому дорівнює відношення заряду кульки q до її маси m , якщо радіус орбіти $R=2$ см, а кутова швидкість обертання $\omega=3$ рад/с?

13. На дно посудини з маслом вміщено діелектричну кулю, діаметр якої $d - 2,8$ см, рівномірно заряджену зарядом $q=2$ мкКл. Густина масла $\rho=820$ кг/м³, речовини кулі $\rho_1=926$ кг/м³. Визначити напруженість електричного поля в маслі, при якій куля почне спливати. Лінії напруженості однорідного електричного поля напрямлені вертикально вгору.

14. Маятник складається з металевої кульки, підвішеної на невагомій нерозтяжній непровідній нитці. Як зміниться період його коливань, якщо кульці надати позитивного заряду, а іншу кульку, заряджену негативно, розмістити знизу на одній вертикалі з ниткою підвісу маятника?

15. Заряджена частинка масою m , яка має заряд q_1 , рухається навколо нерухомого точкового заряду q_2 по еліптичній орбіті (рис. 3.2). Мінімальна відстань між зарядом і частинкою q_1 дорівнює r , а максимальна – R . Чому дорівнює період обертання частинки навколо заряду q_2 ?

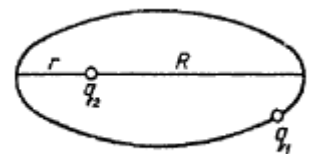


Рис. 3.2

16. Тіло масою m з позитивним електричним зарядом q кинути під кутом α до горизонту з початковою швидкістю v_0 . Рух тіла відбувається одночасно в полі тяжіння і однорідному електричному полі з напруженістю E . Лінії напруженості напрямлені вертикально вниз. Визначити час польоту тіла t , відстань польоту l і висоту максимального підйому h_{\max} .

17. На вертикальній пластині достатньо великих розмірів рівномірно розподілений електричний заряд з поверхневою густиною $\sigma=3$ нКл/см². До пластини прикріплена нитка з підвішеною на ній кулькою, маса якої $m=1$ г.

Кулька має заряд того самого знака, що й пластина. Обчислити заряд q кульки, якщо нитка утворює з вертикаллю кут $\alpha=30^\circ$.

18. В однорідному електричному полі напруженістю $E=1,5$ кВ/м, що напрямлене вертикально вниз, рівномірно обертається кулька, маса якої $m=1$ г і позитивний заряд $q=0,2$ мкКл. Кулька підвішена на нитці, довжина якої $l=20$ см. Кут відхилення нитки від вертикалі $\alpha=30^\circ$. Визначити період T обертання кульки і силу натягу F_n нитки.

Принцип суперпозиції електричних полів

19. Вважаючи протон і електрон, з яких складається атом водню, за точкові заряди, що розміщуються на відстані $r=5 \cdot 10^{-9}$ см, визначити модуль E напруженості електричного поля в точках B і C (рис. 3.3).

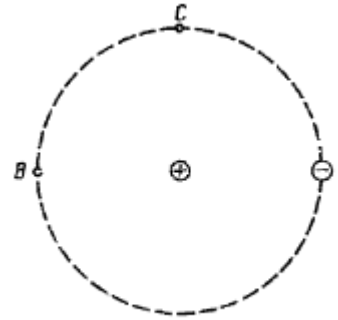


Рис. 3.3

20. Досить довга нитка рівномірно заряджена з лінійною густиною τ . Визначити модуль E напруженості електричного поля в точці A , яка міститься навпроти кінця нитки на відстані a від неї.

21. Рівномірно заряджена тонка нитка, довжина якої $l=20$ см, має лінійну густина заряду $\tau=10$ нКл/м. На відстані $a=10$ см від нитки, навпроти її середини, міститься точковий заряд $q=1$ нКл. Яка сила F діє на цей заряд з боку зарядженої нитки?

22. Тонке півкільце радіуса $R=10$ см, рівномірно заряджене з лінійною густиною $\tau=1$ мкКл/м, розташоване у вакуумі. Визначити силу F взаємодії півкільця з точковим зарядом $q=20$ нКл, що міститься у центрі кривизни, і модуль E напруженості електричного поля у цій точці.

23. Однакові точкові заряди $q_1=q_2=3$ нКл розміщені на відстані $l=10$ см один від одного. Визначити напруженість E електричного поля у точках, які лежать на перпендикулярі до середини відрізка, що сполучає заряди, на відстані $h=5$ см від середини. На якій відстані h_{\max} напруженість досягає максимуму?

24. Тонке кільце, радіус якого $R=10$ см, заряджене з лінійною густиною $\tau=8$ нКл/м. Визначити модуль E напруженості електричного поля у точках, що лежать: а) на осі кільця на відстані $x=15$ см від його центра; б) у центрі кільця; в) на великій відстані $x \gg R$ від кільця. На якій відстані x_{\max} напруженість поля досягне максимального значення? Обчислити це значення.

25. Тонкий однорідний диск радіуса R заряджений рівномірно з поверхневою густиною σ . Визначити напруженість E електричного поля у вакуумі: а) на висоті h над диском на осі симетрії; б) у центрі диска; в) на великій відстані $x \gg R$ від диска.

26. Дві довгі однойменно заряджені нитки розміщені на відстані $l=10$ см одна від одної. Лінійна густина заряду на нитках $\tau=10$ мкКл/м. Встановити модуль та напрям вектора напруженості E результуючого електричного поля в точці, що міститься на відстані $x_0=10$ см від кожної нитки.

27. Дві довгі паралельні нитки рівномірно заряджені з лінійною густиною $\tau=0,5$ мкКл/м. Відстань між нитками $l=45$ см. Визначити максимальне значення модуля E напруженості електричного поля в площині симетрії цієї системи, розміщеній між нитками.

28. Визначити напруженість E електричного поля у центрі рівномірно зарядженої півсфери. Поверхнева густина заряду на півсфері $\sigma=3$ нКл/м².

Електричний диполь

29. Електричний диполь із зарядами $q_1=+90$ нКл, $q_2=-90$ нКл, відстань між якими $l=10$ см, перебуває в повітрі. Визначити модуль E напруженості електричного поля: а) на осі диполя на відстані $l/4$ від одного з його зарядів; б) у центрі диполя; в) на перпендикулярі до осі диполя, що проходить через один із його зарядів, на відстані $l/2$; г) на перпендикулярі до осі диполя, поставленому з його середини, на відстані $l/2$.

30. Диполь з електричним моментом $p_e=0,12$ нКл·м утворений двома точковими зарядами $q=\pm 1$ нКл. Обчислити модуль E напруженості поля для точок: а) осі диполя; б) площини, яка перпендикулярна до осі диполя і проходить через його центр. Точки містяться на відстані $r=80$ см від центра диполя.

31. Електричні заряди розміщені у вершинах квадрата зі стороною l , як показано на рис. 3.4 (квадруполь). Визначити модуль E напруженості електричного поля, яке створюється квадруполем, у точці A , що розміщена на відстані x від центра квадрата, за умови $x \gg l$.

32. Диполь з електричним моментом $p_e=200$ пКл·м міститься в неоднорідному полі, неоднорідність якого характеризується величиною $dE/dx=1$ МВ/м² у напрямі осі диполя. Обчислити силу, що діє на диполь у цьому напрямі.

33. Точковий диполь з електричним моментом $p_e=5$ пКл·м вільно розмістився в полі точкового заряду $q=100$ нКл на відстані $r=10$ см від нього. Визначити для цієї точки величину $|dE/dr|$, що характеризує ступінь неоднорідності поля в напрямі силової лінії, і силу F , що діє на диполь.

34. Диполь з електричним моментом $p_e=7$ пКл·м міститься в полі довгої нитки, зарядженої рівномірно з лінійною густиною $\tau=300$ нКл/м на відстані $r=8$ см від неї. Обчислити силу F , яка діє на диполь, якщо вектор дипольного електричного моменту p_e орієнтований: а) уздовж нитки; б) у напрямі силових ліній поля.

35. Визначити силу взаємодії двох молекул водяної пари, диполі яких є продовженням один одного. Електричний дипольний момент молекули води $p_e = 6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Молекули містяться одна від одної на відстані $x = 10^{-7}$ см.

36. Визначити взаємну потенціальну енергію $W_{\text{п}}$ двох молекул водяної пари, вважаючи їх точковими диполями з електричними моментами $p_e = 6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Диполі перебувають у стані стійкої рівноваги на відстані $x = 10^{-5}$ см один від одного.

37. Диполь з електричним моментом $p_e = 2$ нКл·м міститься в однорідному електричному полі, напруженість якого $E = 30$ кВ/м. Вектор дипольного електричного моменту p_e утворює кут $\alpha_0 = 60^\circ$ з напрямом силових ліній поля. Визначити роботу, виконану зовнішніми силами під час повертання диполя на кут $\beta = 30^\circ$.

38. Перпендикулярно до осі диполя з електричним моментом $p_e = 12$ пКл·м утворюється однорідне електричне поле напруженістю $E = 300$ кВ/м. Під дією сил поля диполь починає обертатися відносно осі, яка проходить через його центр. Встановити кутову швидкість диполя в той час, коли диполь проходить положення рівноваги. Момент інерції диполя відносно осі, яка проходить перпендикулярно до осі диполя через його центр, $I = 2 \cdot 10^{-9}$ кг·м².

39. Визначити енергію W диполя, електричний момент якого $p_e = 4 \cdot 10^{-9}$ Кл·м. Диполь міститься в зовнішньому однорідному електричному полі напруженістю $E = 3 \cdot 10$ В/м, а вісь диполя утворює кут $\alpha = 30^\circ$ з напрямом напруженості поля.

40. Диполь з електричним моментом $p_e = 60$ пКл·м вільно встановився в електричному полі плоского конденсатора. Поверхнева густина заряду на пластинах конденсатора $\sigma = 10$ нКл/м². Як зміниться потенціальна енергія диполя, якщо повернути його на кут $\alpha = 30^\circ$?

Потік вектора напруженості. Електростатична теорема Гаусса

41. Чому дорівнює потік Φ_D вектора електричного зміщення D крізь сферичні поверхні S_1 і S_2 та крізь довільні замкнені поверхні S і S_3 (рис. 3.5)?

42. Чи можуть перетинатися: силові лінії; еквіпотенціальні поверхні? Пояснити.

43. На деякій відстані від нескінченної рівномірно зарядженої площини розміщений круг радіуса $r = 15$ см, який паралельний площині. Поверхнева густина заряду площини $\sigma = 2$ мкКл/м². Обчислити потік Φ_E вектора напруженості E електричного поля крізь круг.

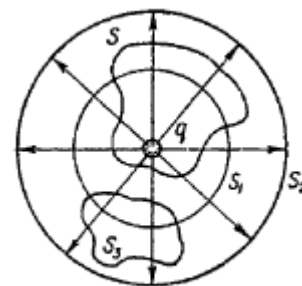


Рис. 3.5

44. На відстані $a=30$ см від нескінченної рівномірно зарядженої нитки розташована кругла площадка, радіус якої $r=1$ мм (рис. 3.6). Визначити приблизно потік Φ_E вектора напруженості E крізь цю площадку, якщо її площина утворює кут $\alpha=30^\circ$ з лінією напруженості електричного поля, що проходить через центр площадки. Лінійна густина заряду нитки $\tau=30$ нКл/м.

45. У центрі куба міститься точковий заряд q . Чому дорівнює потік Φ_E вектора напруженості E : а) крізь повну поверхню куба; б) крізь одну з його граней?

46. Заряд $q=0,5$ мкКл міститься у вершині кругового конуса, висота якого $h=30$ см і радіус основи $r=10$ см, у вакуумі. Обчислити потік Φ_D вектора електричного зміщення D крізь поверхню конуса.

47. Визначити потік Φ_E вектора напруженості електричного поля E крізь бічну поверхню конуса, висота якого $h=20$ см і радіус основи $r=10$ см. На осі конуса на однакових відстанях від вершини й центра основи розміщений заряд $q=1$ мкКл. Конус міститься у вакуумі.

48. Обчислити потік Φ_E вектора напруженості електричного поля E крізь бічну поверхню прямого кругового циліндра, висота якого $h=20$ см, а радіус основи $r=10$ см. Точковий заряд $q=0,3$ мкКл міститься: а) на осі циліндра на середині висоти; б) у центрі основи.

49. Електричне поле створюється двома нескінченними паралельними пластинами, які рівномірно заряджені з поверхневими густинами зарядів $\sigma_1=2$ нКл/м² і $\sigma_2=-5$ нКл/м². Визначити модуль E напруженості поля: а) між пластинами; б) поза пластинами.

50. На пластинах плоского конденсатора міститься електричний заряд $q=10$ нКл. Площа кожної пластини конденсатора $S=100$ см², діелектрик – повітря. Визначити силу F , з якою притягуються пластини. Електричне поле між пластинами вважати однорідним.

51. Два нескінченних тонкостінних коаксіальних циліндри радіусів $R_1=5$ см і $R_2=10$ см рівномірно заряджені з поверхневими густинами зарядів $\sigma_1=10$ нКл/м² і $\sigma_2=-3$ нКл/м². Простір між циліндрами заповнений повітрям. Визначити модуль E напруженості поля в точках, що містяться на відстанях $r_1=2$ см, $r_2=6$ см, $r_3=15$ см від осі циліндрів.

52. Точковий заряд $q_1=20$ нКл розміщується в центрі непровідної сферичної поверхні радіуса $R=15$ см, на якій рівномірно розподілений заряд $q_2=-20$ нКл. Визначити напруженість електричного поля в точках A і B , які віддалені від центра сфери на відстані $r_A=20$ см, $r_B=10$ см. Чому

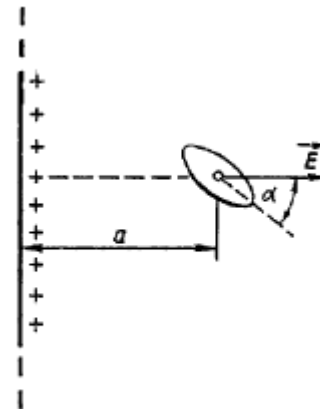


Рис. 3.6

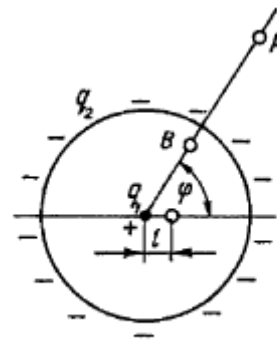


Рис. 3.7

дорівнюватиме напруженість E поля в точці A , якщо заряд q_1 змістити на відстань $l=1$ мм від центра сфери в напрямі, який утворює з радіусом-вектором, проведеним у точку A , кут $\varphi=60^\circ$ (рис. 3.7)?

53. Позитивний об'ємний заряд рівномірно розподілений у вакуумі по об'єму необмеженого плоского шару завтовшки d з об'ємною густиною ρ . Визначити напруженість E поля як функцію відстані x від центра шару.

54. Кулька радіуса $R=2$ см заряджена з об'ємною густиною $\rho=0,7$ мкКл/м³. Обчислити модуль E напруженості поля на відстанях $r_1=1$ см і $r_2=3$ см від центра кульки.

55. Усередині однорідно зарядженої кулі з об'ємною густиною заряду ρ міститься сферична порожнина, центр якої зміщений відносно центра кулі на відстань r_0 (рис. 3.8). Визначити напруженість E поля всередині порожнини. Якою вона буде при $r_0=0$?

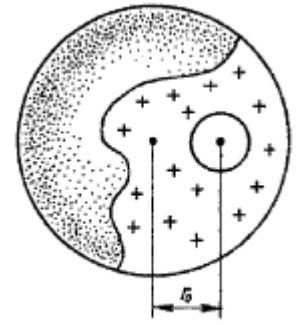


Рис. 3.8

Вказівка. Скористатися принципом суперпозиції полів позитивно об'ємно зарядженої кулі і негативно об'ємно зарядженої кулі з радіусом порожнини.

56. Електричне поле створене рівномірно зарядженим з об'ємною густиною заряду ρ циліндром. Радіус циліндра R , довжина нескінченна. Визначити напруженість E поля як функцію відстані r від осі циліндра.

57. Усередині рівномірно зарядженого з об'ємною густиною ρ циліндра радіуса R_1 міститься циліндрична порожнина радіуса R_2 (рис. 3.9). Вісь порожнини зміщена відносно осі циліндра на відстань r_0 . Радіус циліндра в багато разів менший, ніж його довжина. Визначити напруженість поля E на радіальній прямій, яка проходить через вісь циліндричної порожнини, залежно від відстані r від осі циліндра (див. вказівку до задачі 55).

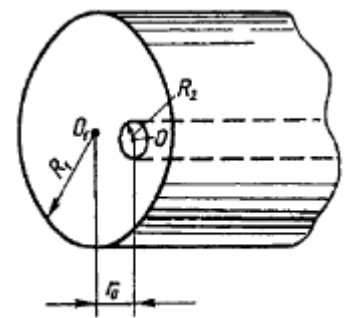


Рис. 3.9

58. Куля радіуса R має позитивний заряд, об'ємна густина якого залежить тільки від відстані r до її центра і виражається як $\rho=\rho_0(1 - r/R)$, де ρ_0 - постійна. Вважаючи, що діелектрична проникність скрізь $\epsilon=1$, визначити: а) модуль напруженості електричного поля всередині та за межами кулі як функцію r ; б) максимальне значення модуля напруженості E_{\max} та відповідне йому значення r_{\max} .

Робота з переміщення електричного заряду. Потенціал. Зв'язок потенціалу електростатичного поля з напруженістю

59. Електричне поле створене зарядом $q=4$ мкКл, який міститься в діелектричному середовищі з проникністю $\epsilon=2$. Визначити роботу

Аелектричних сил з переміщення заряду $q_0=200$ нКл з точки а в точку В, що лежать на відстанях $r_a=2$ см і $r_b=5$ см від заряду q .

60. На відстані $r_1=0,5$ м від поверхні відокремленої металевої кулі радіуса $R=10$ см з поверхневою густиною заряду $\sigma=50$ мкКл/м² міститься заряд q . Щоб наблизити заряд q на відстань $r_2=10$ см до поверхні кулі, потрібно виконати роботу $A=1,5$ Дж. Обчислити значення заряду.

61. У вершинах правильного шестикутника, сторона якого $a=5$ см, розміщені точкові заряди $q=6,6$ нКл кожний. Визначити роботу A , виконану полем під час переміщення заряду $q_1=3,3$ нКл з центра шестикутника до середини однієї зі сторін.

62. Нескінченна нитка заряджена рівномірно. Лінійна густина заряду $\tau=0,1$ мкКл/м. Відстань від нитки до точкового заряду $q=50$ нКл зросла у $\eta=3$ рази. Визначити роботу A сил поля з переміщення заряду.

63. Електрон рухається в напрямі силових ліній однорідного електричного поля напруженістю $E=120$ В/м. Яку відстань s він пролетить у вакуумі до повної втрати швидкості, якщо його початкова швидкість $v_0=1$ 000 км/с? Скільки часу t триватиме політ?

64. Два однакових за модулем точкових електричних заряди розміщено на осі Ox . Один заряд $q_+=2$ нКл міститься в точці з координатою $x_+=1$ см, інший $q_-=-2$ нКл - у точці з координатою $x_-=-1$ см. Визначити роботу A сил електричного поля з переміщення заряду $q_1=4$ нКл з точки $x_1=100$ см у точку $x_2=-100$ см.

65. У полі нерухомого точкового заряду $q=-1,5$ нКл у напрямі до заряду рухається електрон. На відстані $r=5$ см від заряду електрон мав швидкість $v=6 \cdot 10^6$ м/с. Визначити мінімальну відстань r_0 , на яку наблизиться електрон до заряду.

66. Два електрони з однаковою початковою кінетичною енергією $T=100$ еВ рухаються вздовж прямої лінії з нескінченності назустріч один одному. Визначити мінімальну відстань r_{\min} їх зближення.

67. Від позитивно зарядженої пластини вертикально розміщеного плоского конденсатора починає рухатися без початкової швидкості частинка, заряд і маса якої відповідно $q=2$ мкКл і $m=2,5$ г. Визначити відстань h , на яку опуститься частинка, коли вона перебуватиме посередині між пластинами конденсатора, якщо конденсатор вміщено у вакуум. Напруга на конденсаторі $U=600$ В, відстань між пластинами $d=20$ см.

68. У плоскому конденсаторі, який вміщено у вакуум, зависла заряджена краплина ртуті. Відстань між пластинами конденсатора $d=1$ см, до них прикладена різниця потенціалів $U_1=1$ 000 В. Раптом різниця потенціалів зменшилась до значення $U_2=995$ В. За який час і краплина досягне нижньої пластини, якщо вона спочатку була на середині відстані між пластинами?

69. Пробій повітря за нормальних умов настає тоді, коли напруженість електричного поля $E_0=10^6$ В/м. Обчислити найбільший заряду q , що його може вмістити заряджена куля, і потенціал ϕ , до якого можна зарядити цю кулю. Радіус кулі $R=10$ см.

70. Тонкий стрижень завдовжки $l=10$ см рівномірно заряджений зарядом $q=3$ нКл. Визначити модуль E напруженості поля і потенціал ϕ у точці, що лежить на осі стрижня на відстані $x_0=20$ см від ближчого його кінця.

71. Тонке кільце радіуса $R=5$ см позитивно заряджене зарядом $q=17$ нКл. Визначити потенціал ϕ : а) у центрі кільця; б) у точці, що лежить на осі кільця на відстані $h=10$ см від його центра.

72. Металевий диск обертається навколо своєї осі, перпендикулярної до площини диска, з частотою $\nu=100$ с⁻¹. Радіус диска $R=10$ см. Яка різниця потенціалів $\Delta\phi$ виникне між центром диска та точками, що лежать на його ободі?

73. Дві нескінченні паралельні площини містяться на відстані $d=0,5$ см одна від одної. На площинах рівномірно розподілені заряди, поверхневі густини яких відповідно $\sigma_1=0,2$ мкКл/м² і $\sigma_2=-0,3$ мкКл/м². Визначити різницю потенціалів $\Delta\phi$ між площинами.

74. За даними задачі 25 визначити у тих самих точках потенціал ϕ електростатичного поля у вакуумі.

75. Прямий довгий циліндричний провідник радіуса $r_1=1,5$ см позитивно заряджений рівномірно з лінійною густиною $\tau=30$ нКл/м. Яка різниця потенціалів $\Delta\phi$ між поверхнею циліндра та точкою, що міститься на відстані $r_2=3,5$ см від осі циліндра?

Вказівка. Використати розв'язки задач 51, 53-56.

76. Заряд рівномірно розподілений у вакуумі по об'єму нескінченно великої пластини. Товщина пластини d , об'ємна густина заряду ρ . Визначити потенціал ϕ як функцію відстані x від середини пластини. Вважати, що потенціал посередині пластини дорівнює нулеві.

Вказівка. Використати розв'язки задач 51, 53-56.

77. Заряд q рівномірно розподілений у вакуумі в об'ємі кулі радіуса $R=15$ см з об'ємною густиною $\rho=2$ мкКл/м³. Обчислити потенціал ϕ : а) у центрі кулі; б) на поверхні кулі; в) у точках, що лежать від центра кулі на відстані $r_1=10$ см $<R$ і $r_2=20$ см $>R$.

Вказівка. Використати розв'язки задач 51, 53-56.

78. Заряд з об'ємною густиною $\rho=2$ мкКл/м³ міститься в об'ємі циліндричної форми радіуса $r_0=2$ см. Обчислити різницю потенціалів $\Delta\phi$ між точками, що лежать від осі циліндра на відстані $r_1=1$ см і $r_2=-3$ см.

Вказівка. Використати розв'язки задач 51, 53-56.

79. Простір між двома концентричними сферами радіусів R_1 і R_2 заряджений з об'ємною густиною заряду $\rho=\alpha/r^2$, де α - стала величина.

Визначити повний заряд а також модуль E напруженості й потенціал ϕ електричного поля як функції відстані r від центра сфер.

80. Математичному маятнику, маса якого $m=1$ г і період коливань $T_1=1$ с, надали заряду $q=10^{-8}$ Кл. Маятник розмістили в однорідному електричному полі, створеному плоским конденсатором, пластини якого розташовані горизонтально. Період коливань при цьому зменшився до $T_2=0,8$ с. Відстань між пластинами на $\Delta d=1$ см більша від довжини нитки маятника. Визначити: силу F , яка діє на маятник збоку електричного поля; напрям електричного поля; різницю потенціалів U між пластинами; поверхневу густину σ зарядів на пластинах.

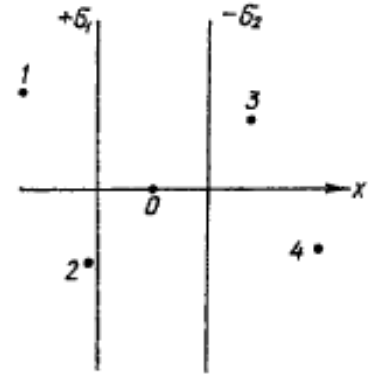


Рис. 3.10

81. Дві паралельні нескінченні площини заряджені різнойменними зарядами з поверхневими густинами відповідно $+\sigma_1$ і $-\sigma_2$. Абсциси вказаних на рис. 3.10 точок такі: $x_1=-3$ м, $x_2=-1$ м, $x_3=+2$ м, $x_4=+3$ м. Різниця потенціалів між точками 2 і 1 $\phi_2 - \phi_1=400$ В. Яка з поверхневих густин ($+\sigma_1$ чи $-\sigma_2$) є більшою за абсолютним значенням? Чому дорівнює різниця потенціалів $\phi_4 - \phi_3$?

82. Знайти вираз для потенціалу ϕ таких електростатичних полів: а) $E=a(yi + xj)$; б) $E=2axyi + a(x - y^2)j$; в) $E=ay i + (ax + bz)j + by k$.

Провідники в електростатичному полі

Напруженість електричного поля:

а) всередині провідника

$$E = 0 \quad (2.1)$$

б) поблизу поверхні провідника у вакуумі

$$E = E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

Електроємність відокремленого провідника

$$C = \frac{q}{\phi} \quad (2.3)$$

Ємність конденсаторів:

а) плоского

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (2.4)$$

б) циліндричного

$$C = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0 l}{\ln(R_2/R_1)} \quad (2.5)$$

в) сферичного

$$C = \frac{4\pi \epsilon \epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (2.6)$$

Ємність батареї конденсаторів у разі послідовного і паралельного з'єднань відповідно

$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i}, \quad C = \sum C_i \quad (2.7)$$

Рівноважний розподіл зарядів у провіднику. Метод дзеркальних відображень

83. На якому фізичному явищі ґрунтується метод електростатичного захисту?

84. Чому провідники для дослідів з електростатики роблять порожнистими?

85. Накреслити графік залежності потенціалу й напруженості електростатичного поля від відстані до центра зарядженої металевої кулі радіуса r , оточеної товстою металевою оболонкою, внутрішній радіус якої R_1 ($R_1 > r$), а зовнішній R_2 .

86. Як розподіляться заряди на заряджених мідній та сталевій кулях під час їх дотикання? Маса куль є однаковими.

87. Чи виникне струм у провіднику, яким з'єднані металеві кулі різних радіусів, якщо надати їм однакових негативних зарядів?

88. В однорідне електричне поле напруженістю $E_0 = 2$ кВ/м внесено тонку металеву пластину, площина якої перпендикулярна до напрямку електричного поля. Чому дорівнює поверхнева густина заряду на пластині?

89. Велику вертикальну металеву пластину з поверхневою густиною заряду σ на кожному боці помістили в однорідне електричне поле напруженістю E перпендикулярно до ліній напруженості. Визначити напруженість поля всередині й зовні пластини та поверхневу густина зарядів, яка виникає на її правому й лівому боках.

90. Велика металева пластина розташована у вертикальній площині та заземлена (рис. 3.11). На відстані $a = 10$ см від пластини міститься нерухома точка, до якої на нитці підвішена маленька кулька. Довжина нитки $l = 12$ см, маса кульки $m = 0,1$ г. Під час надання кульці заряду q нитка відхилилася від вертикалі на кут $\alpha = 30^\circ$. Обчислити заряд q кульки.

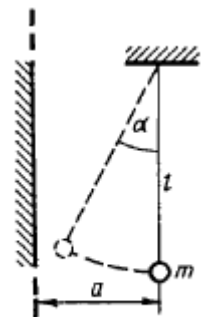


Рис. 3.11

91. Точковий заряд $q = 10^{-8}$ Кл міститься на відстані $d = 3$ см від плоскої металевої пластини, яка заземлена. Визначити силу взаємодії між зарядом і пластиною.

92. Три різнойменних точкових заряди розміщені у вершинах квадрата з діагоналлю $l = 50$ см, як показано на рис. 3.12. Точка O - центр квадрата, AOB - прямий кут, утворений двома металевими напівплощинами. Визначити силу F , що діє на заряд $-q$, якщо його числове значення $q = 11$ мкКл.

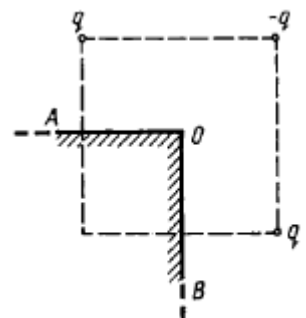


Рис. 3.12

93. Два точкових заряди $q=2$ нКл розміщені на відстанях $h=5$ см від металевої площини і на відстані $2h=10$ см один від одного. Визначити сили, що діють на кожний заряд.

94. Довга нитка, яка рівномірно заряджена з лінійною густиною заряду $\tau=1$ мкКл/м, підвішена паралельно нескінченній провідній площині на відстані $h=10$ см від неї. Визначити напруженість і потенціал електричного поля на поверхні провідника в точках, що лежать на прямій, яка перпендикулярна до поверхні й проходить крізь нитку.

Електроємність. Конденсатори. З'єднання конденсаторів у батареї

95. Визначити ємність C відокремленої металевої кулі радіуса $R=5$ см у повітрі.

96. Кулька, заряджена до потенціалу $\varphi=1$ кВ, має поверхневу густина заряду $\sigma=180$ нКл/м². Визначити радіус кульки.

97. Обчислити ємність C плоского повітряного конденсатора, площа пластин якого $S=100$ см², відстань між ними $d=2$ мм. Чому дорівнюватиме заряд q кожної пластини, якщо конденсатор підімкнути до клем батареї з напругою $U=24$ В?

98. Пластини плоского конденсатора, відстань між якими $d=12$ см, з'єднані з кондуктором електростатичної машини, яка дає різницю потенціалів 12 кВ. Побудувати графік зміни потенціалу між пластинами конденсатора. За графіком визначити потенціал поля на відстанях 3, 6 і 9 см від позитивно зарядженої пластини. Визначити напруженість E поля між пластинами конденсатора.

99. Як зміниться ємність плоского конденсатора, якщо між його обкладками розмістити металеву пластину, товщина якої становить $\eta=0,6$ відстані між обкладками конденсатора?

100. Двом однаковим кулькам, що з'єднані тонким дротом, надали загального заряду $q=0,6$ мкКл. Радіуси кульок $r_1=5$ см. Одну з них оточили концентричною сферою радіуса $r_2=10$ см і заземлили. Яким буде заряд q_1 на цій кульці?

101. Є дві провідні кулі. Одна з них ємністю $C_1=10$ пФ має заряд $q=150$ пКл, а інша, радіус якої $r_2=2$ см, заряджена до потенціалу $U=30$ В. Визначити поверхневу густина зарядів на кулях після з'єднання їх тонким довгим провідником.

102. Внутрішній радіус сферичного повітряного конденсатора $R_1=5$ см, зовнішній $R_2=7$ см. На конденсатор подано напругу $U=40$ кВ. Чи буде пробитий конденсатор, якщо пробивна напруженість електричного поля в повітрі $E_{пр}=30$ кВ/см?

103. Радіус внутрішньої обкладки повітряного сферичного конденсатора $r=1$ см, радіус зовнішньої обкладки $R=4$ см. Між обкладками

прикладена різниця потенціалів $U=3$ кВ. Обчислити напруженість електричного поля E на відстані $x=3$ см від центра конденсатора.

104. Радіус внутрішньої сфери повітряного сферичного конденсатора $R_1=9$ см, радіус зовнішньої сфери $R_2=10$ см. Зовнішня сфера заземлена, а внутрішня має потенціал $U=5$ кВ. Якщо в простір між сферами налити гасу, то напруга на конденсаторі спаде. Щоб одержати попереднє значення напруги, внутрішній сфері потрібно додатково надати заряду Δq . Обчислити числове значення цього заряду.

105. Вакуумний циліндричний конденсатор має радіус внутрішнього циліндра $R_1=2$ см і зовнішнього $R_2=3$ см. Між циліндрами прикладена різниця потенціалів $U=2,3$ кВ. Яку швидкість набуде електрон під дією цього конденсатора, якщо він рухатиметься з відстані $r_1=2,7$ см до відстані $r_2=2,5$ см від осі циліндра?

106. Два конденсатори зарядили відповідно до напруг $U_1=200$ В і $U_2=50$ В і з'єднали паралельно. Чому дорівнюватиме різниця потенціалів між обкладками, якщо $C_1=2C_2$?

107. Два конденсатори зарядили відповідно до напруг $U_1=300$ В, $U_2=100$ В і з'єднали паралельно. Встановити відношення ємностей, якщо різниця потенціалів між обкладками конденсаторів стала дорівнювати $U=250$ В.

108. Два конденсатори ємностями $C_1=0,2$ мкФ і $C_2=0,4$ мкФ з'єднали послідовно і підімкнули до джерела напруги $U=200$ В. Визначити заряди q_1 і q_2 конденсаторів та різницю потенціалів U_1 і U_2 між їх обкладками.

109. Два конденсатори ємностями C_1 і C_2 , які розраховані на максимальні напруги відповідно U_1 та U_2 , з'єднані: а) послідовно; б) паралельно. Яку напругу U можна подати на такі системи конденсаторів?

110. Які ємності системи конденсаторів можна одержати, комбінуючи конденсатори ємностями 2, 4 і 6 пФ?

111. На рис. 3.13 зображена схема з'єднання конденсаторів. Визначити ємність батареї конденсаторів за умови, що ємність конденсаторів $C_1=C_3=C$; $C_2=C_4=C_5=2C$.

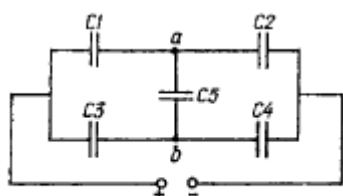


Рис. 3.13

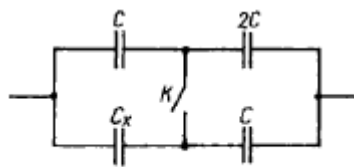


Рис. 3.14

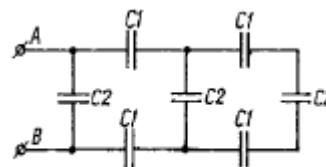


Рис. 3.15

112. У схемі (рис. 3.14) ємність батареї конденсаторів у разі замикання ключа K не змінюється. Визначити ємність C_x , якщо $C=4$ мкФ.

113. Обчислити загальну ємність C системи конденсаторів $C_1=2$ мкФ і $C_2=1$ мкФ. Напруга подається до точок A і B (рис. 3.15).

114. До конденсатора ємністю C_6 , який заряджено до потенціалу U , приєднали батарею з $n=5$ конденсаторів тієї самої ємності (рис. 3.16). Визначити заряд на кожному з конденсаторів.

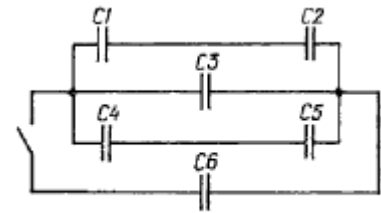


Рис. 3.16

115. Дві провідні кулі радіусів $a=5$ см розміщені на відстані $r=50$ см між їхніми центрами.

Кулям надали деяких зарядів, унаслідок чого їхні потенціали стали $\phi_1=0,5$ кВ, $\phi_2=1$ кВ. Якими є заряди куль? Перерозподілом зарядів на кулях, що зумовлений взаємною електростатичною індукцією, нехтувати.

116. Якими будуть заряди й потенціали куль, описаних у задачі 3.115, якщо другу кулю заземлити?

117. Визначити електроємність системи, яка складається з двох провідних куль радіусів a . Кулі розміщені на відстані r між їхніми центрами, що є значно більшою від радіусів куль.

118. Два довгих паралельних циліндричних проводи з радіусами a розміщені у повітрі на відстані d між осями. Визначити взаємну ємність проводів на одиницю довжини за умови, що $d \gg a$.

Електростатичне поле в діелектриках

Поляризованість ізотропного діелектрика

$$P = \chi \varepsilon_0 E \quad (3.1)$$

де χ - діелектрична сприйнятливість.

Поверхнева густина зв'язаних зарядів

$$\sigma' = P_n \quad (3.2)$$

де P_n - проекція поляризованості на зовнішню нормаль до поверхні.

Електричне зміщення

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon \varepsilon_0 E \quad (3.3)$$

де ε - діелектрична проникність, $\varepsilon=1+\chi$.

Напруженість поля в однорідному та ізотропному діелектрику, який заповнює простір між екіпотенціальними поверхнями, ослаблюється в ε разів:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

Теорема Гаусса для електростатичного поля в діелектриках

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum q_i \quad (3.5)$$

де $\sum q_i$ - алгебрична сума сторонніх (вільних) електричних зарядів, які містяться всередині замкненої поверхні S .

Граничні умови на межі поділу двох діелектриків:

$$E_{1l} = E_{2l} \quad (3.6)$$

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (3.7)$$

Поляризація діелектриків

119. Між обкладками зарядженого плоского конденсатора міститься пластинка з фарфору, яка дотикається до його пластин. У скільки разів η зміниться різниця потенціалів, якщо вийняти пластинку з конденсатора?

120. Плоский конденсатор заповнено слюдою ($\epsilon=7$). Площа кожної пластини $S=100 \text{ см}^2$, її заряд $q=40 \text{ нКл}$, між пластинами прикладена напруга $U=600 \text{ В}$. Визначити відстань d між пластинами.

121. Визначити ємність C циліндричного конденсатора, довжина якого $l=5 \text{ см}$, радіус зовнішньої обкладки $R_2=1,5 \text{ см}$, радіус внутрішньої обкладки $R_1=0,3 \text{ см}$. Простір між обкладками заповнено парафіном.

122. Радіус внутрішньої кулі повітряного сферичного конденсатора $R_1=3,5 \text{ см}$, радіус зовнішньої кулі $R_2=4 \text{ см}$. Між кулями прикладена різниця потенціалів U_0 . Якщо простір між сферами заповнити рідким діелектриком ($\epsilon=4$), то напруга на конденсаторі зменшиться. Щоб одержати попереднє значення напруги U_0 , внутрішній сфері потрібно надати додаткового заряду $\Delta q=650 \text{ нКл}$. Визначити напругу U_0 .

123. Дві однойменно заряджені кульки, підвішені на нитках однакової довжини, опускаються в рідкий діелектрик, густина якого $\rho_1=0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Якою має бути діелектрична проникність середовища ϵ , щоб кут розходження ниток у повітрі та в рідині був однаковим? Густина матеріалу кульок $\rho=1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

124. Два однакових повітряних конденсатори з'єднано послідовно в батарею, яку підімкнено до джерела струму. Визначити, як зміниться напруга на одному з конденсаторів, якщо інший помістити в трансформаторне масло.

125. Діелектрична проникність середовища між пластинами плоского конденсатора рівномірно змінюється від $\epsilon_1=3$ до $\epsilon_2=7$. Площа кожної пластини $S=200 \text{ см}^2$, відстань між пластинами $d=1 \text{ см}$. Визначити ємність C конденсатора.

126. Плоский конденсатор, між обкладками якого міститься скляна пластинка ($\epsilon=6$) завтовшки $d=2 \text{ мм}$, заряджений до напруги $U=200 \text{ В}$. Нехтуючи розміром зазору між пластинкою й обкладками, визначити поверхневу густину σ вільних зарядів, а також поверхневу густину σ' зв'язаних зарядів (зарядів поляризації) на склі.

127. До пластин плоского конденсатора, відстань між якими $d=3 \text{ см}$, прикладена різниця потенціалів $U=1000 \text{ В}$. Простір між пластинами заповнюється діелектриком ($\epsilon=7$). Визначити поверхневу густину σ' зв'язаних зарядів і зміну $\Delta\sigma$ поверхневої густини заряду на пластинах у разі заповнення конденсатора діелектриком. Розв'язати задачу, враховуючи, що заповнення конденсатора діелектриком відбувається: а) при ввімкненому джерелі різниці потенціалів; б) після від'єднання конденсатора від джерела напруги,

128. Між пластинами плоского конденсатора, які розміщуються на відстані $d=5$ мм одна від одної, прикладена напруга $U=900$ В. Простір між пластинами заповнено діелектриком ($\epsilon=3$). Визначити: напруженість електричного поля E в діелектрику; електричне зміщення D у діелектрику; діелектричну сприйнятливість χ діелектрика; поляризованість P діелектрика; поверхневу густину σ зарядів на пластинах конденсатора; поверхневу густину σ' зв'язаних зарядів.

129. Плоский конденсатор, відстань між пластинами якого $d=4$ мм, занурено в гас. Яку напругу треба прикласти до конденсатора, щоб поверхнева густина зв'язаних зарядів у гасі набула значення $\sigma'=4,4$ нКл/см²?

130. Нескінченна плоскопаралельна скляна пластина ($\sigma=7$) вміщена в однорідне електричне поле перпендикулярно до нього. Напруженість поля $E_0=400$ В/м. Визначити напруженість поля E та електричне зміщення D всередині пластини, поляризованість P скла та поверхневу густину σ' зв'язаних зарядів.

131. Металевій ізолюваній кулі радіуса $R=10$ см надали заряду $q=5 \cdot 10^{-6}$ Кл, потім на поверхню кулі нанесли шар діелектрика завтовшки $h=2$ см. Чому дорівнюють густини зв'язаних зарядів та повні поляризаційні заряди на внутрішній і зовнішній поверхнях шару діелектрика, якщо діелектрична проникність діелектрика $\epsilon=2$?

132. Точковий заряд $q=1,5$ мкКл оточений концентричним з ним шаром діелектрика ($\epsilon=3$). Внутрішній радіус сферичного шару $R_1=5$ см, зовнішній $R_2=7$ см (рис. 3.17). Обчислити значення зв'язаних зарядів q' на поверхнях сферичного шару, а також поляризованість P і напруженість електричного поля E у точках, що віддалені від центра на $r_1=3$ см, $r_2=6$ см, $r_3=9$ см.

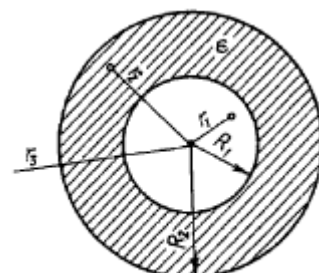


Рис. 3.17

133. Простір між обкладками плоского конденсатора заповнений діелектриком, діелектрична проникність якого змінюється в напрямі, перпендикулярному до обкладок, за лінійним законом від значення ϵ_1 поблизу однієї обкладки до $\epsilon_2 > \epsilon_1$ біля іншої. Конденсатор перебуває під напругою U , причому позитивний вільний заряд виникає на обкладці, біля якої ϵ має менше значення. Площа кожної обкладки дорівнює S , а відстань між ними d_1 . Визначити: а) ємність C конденсатора; б) знак і середнє значення об'ємної густини $\langle \rho' \rangle$ зв'язаних зарядів, які виникають усередині діелектрика.

Умови на межі поділу діелектриків

134. Між обкладками плоского конденсатора, площа яких $S=100$ см², розміщуються дві плоскопаралельні пластинки з фарфору та ебоніту

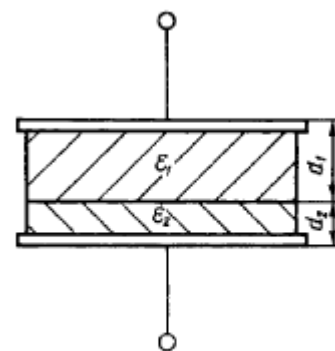


Рис. 3.18

завтовшки d_1 та d_2 (рис. 3.18). Відстань між обкладками конденсатора $d=2$ см. До обкладок прикладена різниця потенціалів $U=500$ В. Визначити модулі векторів зміщення D та напруженості E електричного поля в кожному шарі, спад напруги U в кожному шарі, ємність C конденсатора, поверхневу густину заряду σ на обкладках у разі, коли $d_1=d_2=1$ см.

135. Визначити ємність плоского конденсатора, якщо простір між обкладками заповнено діелектриками з проникностями ϵ_1 і ϵ_2 , як показано на рис. 3.19. Відстань між обкладками конденсатора d , а відповідні кожному діелектрику площі поверхні обкладки становлять S_1 і S_2 .

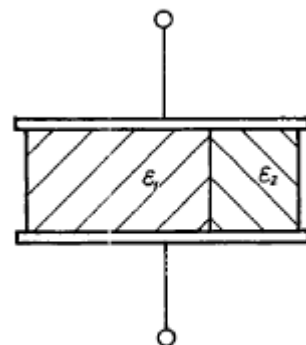


Рис. 3.19

136. Площа обкладок плоского повітряного конденсатора $S=200$ см², відстань між ними $d=3$ мм. Конденсатор заряджається від джерела з напругою $U=150$ В. Потім його від'єднують від батареї і між обкладками вміщують діелектричну пластинку з фарфору ($\epsilon=5$) такої самої площі S , її товщина $l=1$ мм. Визначити: початкову ємність C конденсатора; заряд q на кожній обкладці до введення діелектрика; зв'язаний заряд $q_{зв}$ що виникає на поверхні фарфорової пластинки; напруженість електричного поля E_1 між кожною обкладкою конденсатора і поверхнею діелектрика; напруженість електричного поля E_2 в діелектрику; різницю потенціалів U_1 між обкладками після введення діелектрика; ємність C_1 конденсатора з діелектриком.

137. Плоский повітряний конденсатор, відстань між пластинами якого $d_1=6$ см, а площа кожної пластини $S=200$ см², підімкнутий до батареї з напругою $U=600$ В. У конденсатор вміщують діелектричну пластинку завтовшки $d_2=3$ см. Визначити зміну заряду Δq на пластинах конденсатора, якщо діелектрична проникність матеріалу вміщеної пластинки $\epsilon=2,8$.

138. На плоский повітряний конденсатор, товщина повітряного шару в якому $d=1,5$ см, подається напруга $U=39$ кВ. Чи буде пробитий конденсатор, якщо: а) гранична напруженість електричного поля в повітрі $E_{гр}=30$ кВ/см; б) між його обкладками помістити скляну пластинку ($\epsilon=7$), товщина якої $d_1=0,3$ см? Гранична напруженість електричного поля для скла $E_{гр,с}=100$ кВ/см.

139. Відстань між пластинами плоского конденсатора $d=5$ мм, різниця потенціалів $U=150$ В, площа пластин $S=200$ см². На нижній пластині лежить плитка парафіну завтовшки $d_1=4$ мм. Визначити поверхневу густину зв'язаних зарядів σ' на парафіні та ємність C конденсатора.

140. Гірська порода складається з плоских паралельних шарів кварцу ($\sigma_1=4,8$), кальциту ($\sigma_2=7,5$) і

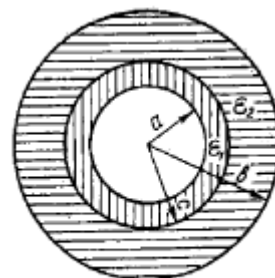


Рис. 3.20

вапняку ($\sigma_3=10$). Товщини шарів відповідно $d_1=0,5$ м, $d_2=1$ м і $d_3=1,5$ м. Вважаючи, що порода міститься в однорідному електричному полі, силові лінії якого перпендикулярні до межі поділу шарів, обчислити напруженості поля в кожному шарі, а також поверхневу густину зв'язаних зарядів на них, якщо до всієї породи прикладена різниця потенціалів $U=1\ 000$ В.

141. Простір між обкладками сферичного конденсатора заповнений двома концентричними шарами діелектриків з діелектричною проникністю $\sigma_1=3$ (шар, що прилягає до внутрішньої обкладки) і $\sigma_2=7$. Радіуси обкладок $a=10$ см і $b=12$ см. Межа поділу діелектриків розміщена на відстані $c=11$ см від центра (рис. 3.20). Визначити ємність C конденсатора та розподіл зв'язаних зарядів у діелектриках, якщо заряд внутрішньої обкладки $q=20$ нКл.

142. Металева куля радіуса $R_1=5$ см оточена сферичним шаром діелектрика ($\epsilon=7$), товщина якого $d=1$ см, та другою металевою поверхнею радіуса $R_2=7$ см, концентричною з першою. Чому дорівнює електроємність C такого конденсатора? Яким має бути радіус R металевої кулі, щоб вона в необмеженому діелектрику мала таку саму ємність?

143. Однорідне електричне поле, напруженість якого в повітрі $E_1=2$ В/м, утворює з нормаллю до скляної пластинки кут $\alpha=30^\circ$. Визначити вектори напруженості E_2 , електричного зміщення D_2 та поляризованості P_2 у склі.

Енергія електричного поля

Енергія взаємодії системи точкових зарядів

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i \quad (4.1)$$

де φ_i - потенціал, що створюється в тій точці, де міститься заряд q_i усіма зарядами, крім i -го.

Енергія відокремленого зарядженого провідника

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad (4.2)$$

Енергія зарядженого конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad (4.3)$$

Об'ємна густина енергії

$$w_e = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (4.4)$$

Сили, що діють в електричному полі.

$$F_x = \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_{q=const} = \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_{\varphi=const} \quad (4.5)$$

де W - енергія, яка виражена як функція від заряду й параметра x або як функція від потенціалу й параметра x .

Сила притягання між двома пластинами зарядженого плоского конденсатора

$$F = \frac{q^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 S} = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2 S}{2} \quad (4.6)$$

Сила, що діє на одиницю площі поверхні зарядженого провідника, оточеного рідким або газоподібним діелектриком, дорівнює об'ємній густині енергії поля поблизу поверхні й напрямлена назовні провідника:

$$F = w_e = \frac{ED}{2} \quad (4.7)$$

Сила, що діє в електричному полі на одиницю площі межі поділу двох діелектриків, дорівнює різниці об'ємних густин енергії електростатичних полів з обох боків межі поділу й напрямлена в бік діелектрика з меншою діелектричною проникністю:

$$F = w_{e2} - w_{e1} \quad (4.8)$$

Енергія системи електричних зарядів. Енергія заряджених провідників

144. Три точкових заряди розміщені у вершинах рівностороннього трикутника. Два з цих зарядів є однойменними і кожний з них дорівнює q , знак третього - протилежний. Яким має бути значення третього заряду q_1 , щоб енергія взаємодії системи зарядів дорівнювала нулеві?

145. Визначити енергію W взаємодії точкових зарядів $q=15$ нКл, які розміщені у вершинах квадрата зі стороною $a=10$ см, якщо: а) заряди є однаковими; б) заряди є однаковими за абсолютним значенням, але два з них негативні й заряди одного знака містяться в протилежних вершинах квадрата.

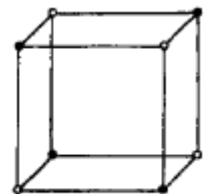


Рис. 3.21

146. Елементарний кристал кухонної солі (рис. 3.21) - це куб зі стороною $d=2,82 \cdot 10^{-8}$ см, у вершинах якого розміщені іони натрію (білі кружечки) і хлору (чорні кружечки). Вважаючи, що заряд іона за абсолютним значенням дорівнює зарядові електрона, визначити енергію W електростатичної взаємодії іонів ізольованого елементарного кристала,

147. Заряджена куля A радіуса $r_1=2$ см стикається з незарядженою кулею B , радіус якої $r_2=3$ см. Після того, як кулі роз'єднали, виявилось, що енергія кулі $BW=0,4$ Дж. Який заряд q_1 був на кулі A до зіткнення?

148. Віддалені одна від однієї металеві кулі радіусами $R_1=25$ см і $R_2=15$ см мають заряди відповідно $q_1=0,12$ мкКл і $q_2=0,5$ мкКл. Яка кількість теплоти Q виділиться в тонкому провіднику, якщо кулі з'єднати між собою?

Енергія зарядженого конденсатора. Енергія електростатичного поля. Густина енергії

149. Конденсатори ємностями $C_1 = 2$ мкФ і $C_2 = 4$ мкФ, що мають заряди $q_1 = 8$ мкКл і $q_2 = 6$ мкКл, з'єднали паралельно. Визначити зміну ΔW енергії конденсаторів.

150. До конденсатора ємністю $C_1 = 2$ мкФ, зарядженого до напруги $U_1 = 600$ В, приєднали паралельно незаряджений конденсатор ємністю $C_2 = 1$ мкФ. Яка кількість енергії W виділиться під час утворення іскри, якщо конденсатори з'єднати?

151. Визначити енергію W електростатичного поля, яке утворюється у повітрі металевою сферою радіуса $R = 5$ см. Сфері надано заряду $q = 200$ нКл.

152. Дві концентричні сферичні поверхні, які вміщено у вакуум, заряджені однаковими зарядами $q = 3$ мкКл. Радіуси цих поверхонь $R_1 = 1$ м і $R_2 = 2$ м. Визначити енергію W електростатичного поля, що міститься у сферичному шарі між цими сферами.

153. Визначити енергію W електростатичного поля у сферичному повітряному конденсаторі, якщо радіус його внутрішньої сфери $R_1 = 10$ см, а зовнішньої $R_2 = 30$ см. У точці, що лежить на відстані $r_1 = 15$ см від центра, напруженість поля $E_1 = 5$ В/м.

154. Визначити енергію W електростатичного поля зарядів, що рівномірно розподілені в об'ємі кулі радіуса $R = 10$ см. Повний заряд кулі $q = 40$ пКл. Яка частка η енергії поля локалізована поза кулею?

155. Визначити енергію W електростатичного поля для розподілу зарядів, який дано у задачі 79.

156. Коаксіальний кабель (рис. 3.22) складається з центрального провідника, діаметр якого $D_1 = 2$ см, і металевої оболонки діаметра $D_2 = 4$ см, проміжок між якими заповнений діелектриком ($\epsilon = 6$). Металева оболонка заземлена, а центральний провідник перебуває під напругою $U = 600$ В. Обчислити енергію W електростатичного поля кабелю на довжині $l = 1$ м.

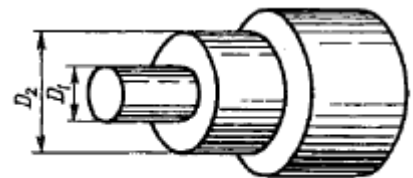


Рис. 3.22

157. Металева сфера радіуса $R = 3$ см має електричний заряд $q = 20$ нКл. Сфера обмежена шаром парафіну, товщина якого $d = 2$ см. Визначити енергію W електростатичного поля в шарі діелектрика.

158. Вважаючи електрон і протон, з яких складається атом водню, точковими зарядами, що містяться на відстані $r = 53$ пм, обчислити густину енергії w_e електричного поля на середині відстані між ними.

159. Визначити об'ємну густину енергії w_e електричного поля, яке створюється нескінченною рівномірно зарядженою ниткою на відстані $r = 3$ см від неї. Лінійна густина заряду на нитці $\tau = 0,2$ мкКл/м. Діелектрична проникність середовища $\epsilon = 3$.

160. Простір між пластинами плоского конденсатора заповнений парафіном. Об'ємна густина енергії електричного поля у парафіні $w_e = 0,49$

Дж/м³. Обчислити поверхневу густину σ' зв'язаних зарядів на поверхні парафіну.

161. Густина енергії поля зарядженого конденсатора $w_e=300$ Дж/м³. З якою силою F притягуються обкладки конденсатора, якщо площа кожної з них $S=100$ см²?

162. Визначити силу притягання F між пластинами плоского конденсатора, якщо площа кожної пластини S , відстань між ними d , діелектрична проникність середовища між пластинами ϵ . Розв'язати задачу за таких умов: а) конденсаторові надали електричного заряду q , після чого його від'єднали від джерела напруги; б) конденсатор приєднали до джерела постійної напруги U . Як залежить сила притягання від відстані між пластинами та діелектричної проникності середовища?

163. Об'ємна густина енергії електричного поля всередині зарядженого плоского конденсатора з твердим діелектриком ($\epsilon=6$) $w_e=2,5$ Дж/м³. Обчислити тиск p , що створюється пластинами, площа яких $S=20$ см², на діелектрик, а також силу F' яку потрібно прикласти до пластин, щоб їх відокремити від діелектрика.

164. На поверхні сфери радіуса R рівномірно розподілений заряд q . Визначити силу, яка діє на одиницю поверхні (електростатичний тиск p).

165. З якою силою F втягується в плоский конденсатор із зарядом q діелектрична пластина, коли вона входить у простір між обкладками на відстань x (рис. 3.23)? Товщина пластини є трохи меншою, ніж відстань між обкладками d , розміри пластини і обкладок a х b , діелектрична проникність діелектрика ϵ .

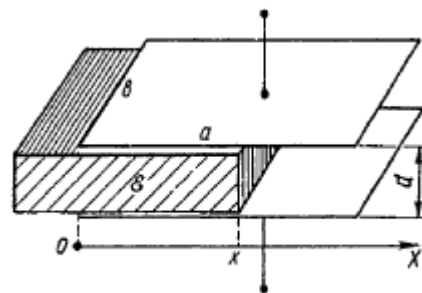


Рис. 3.23

166. Плоский повітряний конденсатор зарядили до різниці потенціалів $U=60$ В і вимкнули джерело ЕРС. Площа кожної пластини $S=200$ см, відстань між ними $d=0,5$ см. Пластины конденсатора розміщено вертикально. Знизу підводять посудину з непровідною рідиною ($\epsilon=2$) так, що вона заповнює половину об'єму між пластинами конденсатора. Чому дорівнює ємність C конденсатора? Обчислити напруженість поля E_1 у повітряній частині проміжку між пластинами і E_2 в частині, заповненій рідиною. Визначити зменшення ΔW енергії конденсатора. На що витратилась ця енергія? Вважати, що межа поділу рідини й повітря є плоскою.

167. Плоский конденсатор ємністю $C=60$ пФ зарядили в повітрі до різниці потенціалів $U=400$ В і від'єднали від джерела ЕРС. Після занурення конденсатора в рідкий діелектрик вертикально до половини висоти його пластин енергія конденсатора зменшилась на $\Delta W=1,2$ мкДж. Визначити діелектричну проникність ϵ діелектрика.

168. Плоский повітряний конденсатор заряджений до різниці потенціалів $U=500$ В. Площа кожної пластини $S=150$ см², відстань між ними $d_1=0,5$ см. Яку роботу A треба виконати, щоб збільшити відстань між пластинами до відстані $d_2=0,8$ см, за таких умов: а) конденсатор від'єднаний від джерела напруги; б) конденсатор підімкнутий до джерела постійної напруги.

169. Плоский повітряний конденсатор, відстань між пластинами якого $d=5$ см, а площа пластин $S=500$ см², під'єднаний до батареї, яка підтримує на конденсаторі постійну напругу $U=2$ кВ. У конденсатор паралельно пластинам вводять металеву плиту завтовшки $d_1=1$ см. Яку роботу A виконує при цьому батарея?

170. Усередині плоского конденсатора, площа пластин якого $S=200$ см², а відстань між ними $d=0,1$ см, міститься пластинка зі скла ($\epsilon=5$), яка повністю заповнює простір між пластинами конденсатора. Як зміниться енергія конденсатора, якщо повільно вийняти скляну пластинку? Розв'язати задачу за таких умов: а) конденсатор увесь час приєднаний до батареї з ЕРС $\epsilon=300$ В; б) конденсатор був спочатку підімкнутий до тієї самої батареї, а потім його від'єднали і після цього пластинку вийняли. Визначити механічну роботу A , яка затрачається на видалення пластинки в обох випадках.

171. Усередині плоского конденсатора розміщується паралельно обкладкам пластинка, товщина якої становить $\eta=0,6$ відстані між обкладками. Ємність конденсатора, коли пластинки немає, $C=20$ нФ, Конденсатор спочатку приєднали до джерела постійної напруги $U=200$ В, потім від'єднали і після цього повільно вийняли пластинку з конденсатора. Визначити роботу A , виконану проти електричних сил при видаленні пластинки, якщо вона: а) металева; б) скляна.

172. Простір між пластинами плоского конденсатора заповнено діелектриком (фарфор), об'єм якого $V=40$ см³. Конденсатор спочатку приєднали до джерела постійної напруги, потім від'єднали. Після цього поверхнева густина зв'язаних зарядів на діелектрику $\sigma'=6$ мкКл/м. Обчислити роботу A , яку треба виконати проти сил електричного поля, щоб видалити діелектрик з конденсатора.

173. Одна з пластин розташованого горизонтально плоского конденсатора занурена під поверхню рідини з густиною ρ і діелектричною проникністю ϵ (рис. 3.24). Площа кожної пластини S . На яку висоту h підніметься рівень рідини в конденсаторі, якщо йому надати заряду q ?

174. Плоский конденсатор занурений одним кінцем у спирт ($\epsilon=25$). Яку різницю потенціалів U треба прикласти, щоб спирт піднявся на висоту $h=1$ см, якщо відстань між пластинами $d=1$ мм (рис. 3.25)? Поверхневим натягом нехтувати.

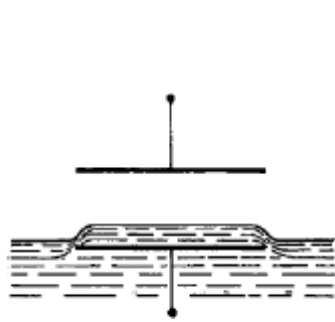


Рис. 3.24

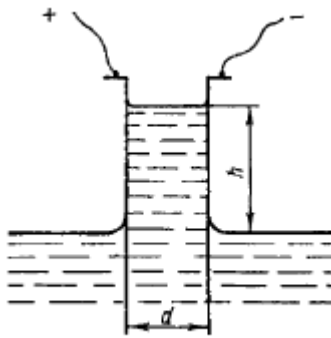


Рис. 3.25

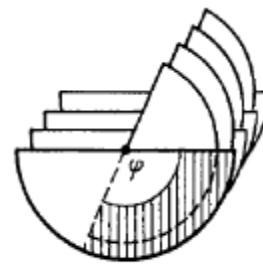


Рис. 3.26

175. Пластини конденсатора змінної ємності (рис. 3.26) мають форму півкрусів радіуса r , відстань між сусідніми рухомими й нерухомими пластинами дорівнює l . Всього є n проміжків між пластинами. Визначити обертальний момент M , який діє на пластини, за таких умов: а) конденсаторові надали заряду q , після чого його від'єднали від джерела напруги; б) на конденсаторі підтримується постійна напруга U .

3.1.2. Постійний струм

3.1.2.1. Вказівки до розв'язку задач на постійний струм

Відповідно до тематики практичних занять до даного модуля включено задачі таких основних груп:

- Визначення електричних параметрів ділянки кола та повного кола в залежності від зміни електричних параметрів на основі законів Ома.
- Визначення електричних параметрів розгалужених кіл.
- Теплова дія струму. Закон Джоуля-Ленца
- Струм в металах. Контактні явища.
- Електричний струм в електролітах, газах, напівпровідниках.
- При розв'язуванні задач, що віднесені до першої групи, головним завданням є визначення сили струму за спадом напруги або спаду напруги за зміною сили струму на ділянці кола чи повному колі, розрахунки опорів. Опір може бути заданий в явному або опосередкованому вигляді. В задачах такого типу можна виділити такі завдання:

а) визначити сили струму на ділянці електричного кола за спадом напруги чи опором та величиною сили струму, що протікає через опір ;

б) визначення параметрів, якщо опір ділянки кола є функцією температури, часу або лінійних розмірів.

в) визначення сили струму або спаду напруги на ділянці кола, якщо ці параметри змінюються з часом;

г) визначення електричних параметрів неоднорідної ділянки і повного кола;

д) розв'язування задач комбінованих на основі перерахованих завдань.

- При розв'язуванні задач, що віднесені до другої групи цього розділу можливі декілька підходів:

а) Використовують співвідношення між струмами і опорами в розгалужених або неоднорідних колах.

б) Складні розгалужені кола спрощують і замінюють еквівалентними схемами.

в) Використовуються правила Кірхгофа.

При складанні рівнянь за правилами Кірхгофа необхідно:

- поділити складне розгалужене коло на прості контури і довільно визначити напрями струмів на окремих їх ділянках;

- довільно вибрати напрями обходу окремих контурів (наприклад, за годинниковою стрілкою);

- застосувати перше правило Кірхгофа для одного з вузлів;

- застосувати друге правило Кірхгофа для кожного з простих контурів керуючись

правилом знаків:

а) якщо вибраний технічний напрям струму в ділянці співпадає з вибраним напрямком обходу контуру, то спади напруг на відповідних опорах беруть із знаком «+», якщо ні - зі знаком «-»;

б) якщо джерело ЕРС, що міститься на простій ділянці підсилює струм у вибраному напрямі обходу контуру, то його беруть зі знаком «+», якщо послаблює, то зі знаком «-».

- скласти достатню кількість незалежних рівнянь. Загальне число рівнянь має відповідати загальному числу невідомих в задачі. За першим правилом Кірхгофа складають на одне рівняння менше, ніж є вузлів у колі. Рівняння для останнього вузла вже не буде незалежним. При складанні рівнянь згідно другого правила Кірхгофа слід дотримуватись такого принципу, щоб до кожного нового контуру входила хоча б одна нова вітка, яка не використовувалася в попередніх контурах.

- Задачі, що віднесені до третьої групи, пояснюють фізичні явища, які виникають при проходженні струму в провідниках першого і другого роду, а саме, роботу і потужність на ділянці кола і повному колі та теплову дію струму. Їх розв'язок базується на використанні законів Ома і Джоуля-Ленца в інтегральній і диференціальній формах.

- Розв'язуючи задачі четвертої групи, необхідно згадати, що:

а) Частина електронів у металах перебуває в стані безперервного хаотичного руху і являє собою «електронний газ». А тому до нього можуть бути застосованими закономірності кінетичної теорії газів.

б) Внаслідок різної концентрації електронів в металах і різниці робіт виходу електронів з металів при однаковій їх температурі між з'єднаними металами існує контактна різниця потенціалів.

в) Якщо існує різниця температур між спаями різнорідних металів, то між цими спаями виникає термоелектрорушійна сила.

• При розв'язуванні задач, що віднесені до п'ятої групи, слід підкреслити, що в них є спільним процеси - перенесення в електричному полі частинок, що мають заряд.

3.1.2.2. Практичні заняття

Практичне заняття № 7.

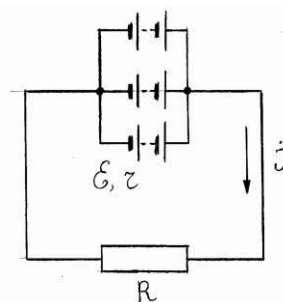
ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЗАКОНИ ОМА.

1. Сила струму в провіднику рівномірно наростає від $I_0=0$ до $I=3$ А за час $t=10$ с. Визначити заряд q , що пройшов по провіднику за цей час.

2. Визначити величину заряду, який пройшов по мідному провіднику довжиною $l=20$ м і площею поперечного перерізу $S=0,17$ м² при температурі 20 °С, якщо напруга на його кінцях змінилася протягом 20 секунд від $U_0=2$ В до $U=4$ В.

3. Як потрібно з'єднати $k=40$ елементів ЕРС, що мають $\varepsilon=2$ В і $r=0,1$ Ом, щоб в колі з зовнішнім опором $R=10$ Ом пройшов максимальний струм?

4. Електричне коло складається з джерела струму з внутрішнім опором $r=0,2$ Ом і зовнішнього $R=12$ Ом. Знайти силу струму I в зовнішньому колі, ЕРС джерела якщо вольтметр показує $U=120$ В. Який опір R_x потрібно включити в зовнішнє коло, щоб по ньому проходив струм $I_1=1$ А? Розрахувати також силу струму $I_{кз}$ при короткому замиканні. Внутрішнім опором вольтметра нехтуємо.



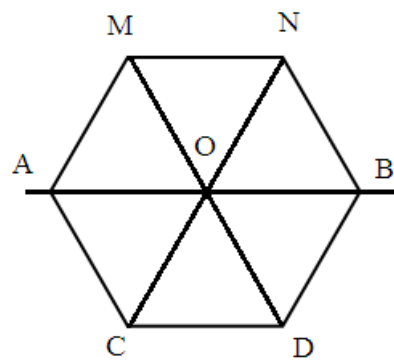
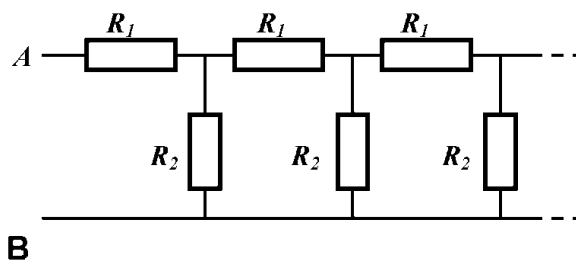
5. Опір вольфрамової нитки електричної лампочки при $t=20$ °С дорівнює $R=35,9$ Ом. Визначити температуру нитки, якщо лампочку ввімкнути в мережу $U=220$ В, і по нитці протікатиме струм $I=0,6$ А. Температурний коефіцієнт опору вольфраму дорівнює $\alpha=4,6 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

6. Вугільний стержень з'єднаний в колі з залізним такої ж товщини. При якому співвідношенні їх довжин зміна спаду напруги на них залишатиметься постійною, не залежною від температури.

Практичне заняття № 8.

ОПІР ПРОВІДНИКІВ. З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ.

1. Знайти опір R_x нескінченної ділянки, що складається з опорів R_1 та R_2 .



2. 12 провідників опором $R=1$ Ом кожний спаяні в куб. Визначити загальний опір з'єднання, якщо куб приєднаний до джерела струму в електричне коло вершинами: 1) по діагоналі грані; 2) по діагоналі куба.

3. 12 провідників опором R кожний спаяні так, як показано на схемі. Визначити загальний опір з'єднання, якщо схема приєднана до джерела струму в електричне коло точками A та D .

Практичне заняття № 9.

РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА.

1. На вході електричної схеми знаходиться свинцевий запобіжник перерізом $S_1=1$ мм². Підвід до споживача зроблено мідним дротом з площею перерізу $S_2=3$ мм². Система знаходиться при температурі $t_0=17$ °С. На яке підвищення температури підвідних провідників розраховано цей запобіжник при короткому замиканні в споживачі, вважаючи, що внаслідок великої швидкості процесу при короткому замиканні енергія при нагріванні не розсіюється.

2. Скільки електронів проходить за 1 с через поперечний переріз мідного дроту довжиною $l=2$ м і площею поперечного перерізу $S=0,4$ мм², якщо при цьому на R_a розсіюється потужність $P=0,35$ Вт.

3. Який повинен бути опір обмотки підмагнічування гучномовця, щоб потужність струму підмагнічування становила $P=8$ Вт. Струм від акумулятора з ЕРС 8 В поступає до гучномовця по лінії опором 1 Ом.

4. Сила струму в провіднику опором $R=10$ Ом протягом $t=2$ с зростає по лінійному закону від $I_0=0$ до $I_{max}=6$ А. Визначити кількість теплоти, що виділяється протягом першої і протягом другої секунд, а також співвідношення цих фізичних величин.

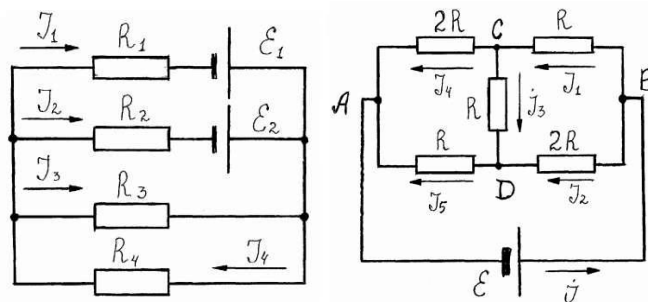
5. Електрочайник має дві нагрівні спіралі. Якщо увімкнути першу, то вода закипає через $t_1=15$ хвилин, якщо увімкнути другу - через $t_2=30$ хвилин. Через який час закипить вода, якщо спіралі з'єднати послідовно, паралельно.

Практичне заняття № 10.

РОЗГАЛУЖЕНІ КОЛА. ПРАВИЛА КІРХГОФА.

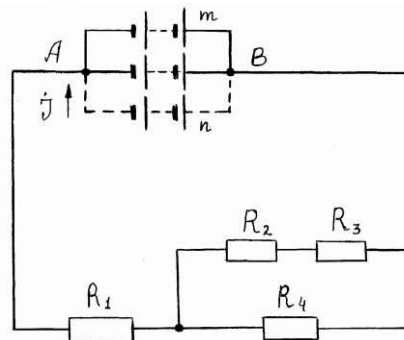
1. Визначити силу струму, що проходить через опори $R_1=R_4=4$ Ом, $R_2=R_3=3$ Ом, увімкнені в коло, як показано на малюнку, якщо $\varepsilon_1=10$ В, $\varepsilon_2=4$ В. Внутрішні опори $r_1=0,2$ Ом, а $r_2=0,1$ Ом.

2. Визначити значення опору R між точками A і B кола, що складається з джерела ЕРС та п'яти провідників, які з'єднані так, як показано на малюнку.



3. Визначити силу струму в колі, що складається з m послідовно з'єднаних джерел ЕРС в n паралельних вітках та зовнішнього опору змішаного з'єднання однакових провідників, як показано на малюнку. Задачу розв'язати при таких даних: $\varepsilon_1 = 1,1$ В; $n = 4$; $m = 5$; $R_1 = 1,5$ Ом; $r = 0,2$ Ом.

4. Накреслити схему електричного кола, що складається з опорів $R_1 = 1,8$ Ом $R_2 = 2,0$ Ом $R_3 = 3,0$ Ом і амперметра, опором якого можна нехтувати. ЕРС джерела 5,6 В, а внутрішній опір 0,5 Ом. Через амперметр протікає струм $I = 0,96$ А.



Практичне заняття № 11.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ, ГАЗАХ, ВАКУУМІ.

1. Визначити електропровідність розчину кухонної солі, якщо при розчиненні $m = 2,92$ г солі в 1 л води 44% молекул солі дисоціювали на іони. Рухливість іонів $u_+ = 45 \cdot 10^{-9}$ мГ/(Вс), $u_- = 68 \cdot 10^{-9}$ мГ/(Вс).

2. При протіканні струму через розчин мідного купоросу на електроді площею $S = 9,65$ см², при густині $j = 0,02$ А/см², виділяється $m = 38,4$ мг міді. Визначити час проходження струму.

3. Через підкислену воду протягом $t = 1$ хв пропускають струм силою $I = 1$ А. Який об'єм займе при нормальних умовах гримучий газ, який при цьому виділиться?

4. У скільки разів збільшиться струм насичення термоелектронної емісії при торіюванні вольфрамового катода при робочій температурі $T = 1860$ К, якщо емісійна стала і робота виходу чистого і торійованого вольфраму відповідно дорівнюють $B_1 = 6,0 \cdot 10^5$ АК⁻²м⁻¹; $A_1 = 4,54$ еВ; $B_2 = 0,3 \cdot 10^5$ АК⁻²м⁻²; $A_2 = 2,63$ еВ.

5. Між пластинами конденсатора, площею 250 см² кожна, знаходиться 375 см водню. Концентрація іонів в газі $5,3 \cdot 10^7$ см³. Яку напругу потрібно прикласти до конденсатора, щоб викликати струм силою 2 мкА? Рухливість іонів $u_+ = 5,4$ см²/(Вс) і $u_- = 7,4$ см/(Вс).

6. В плоскому повітряному конденсаторі з площею пластин $S = 100$ см² кожна і відстанню між ними $d = 5$ см при іонізації рентгенівськими

променями протікає струм насичення $I_n = 10^{-7}$ А. Визначити максимально можливе число іонів в 1 см^3 , якщо іони одновалентні.

Практичне заняття №12.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ТІЛ.

1. Визначити середню швидкість напрямленого руху електронів в мідному провіднику діаметром $d = 1,8 \text{ мм}$, якщо сила струму в ньому 10 А .

2. Визначити величину заряду, який проходить через поперечний переріз срібного провідника $S = 9 \text{ мм}^2$ і довжиною $l = 50 \text{ м}$ за час гальмування, якщо лінійна швидкість елементів обмотки котушки $v = 60 \text{ м/с}$.

3. Металевий диск радіусом $R = 10 \text{ см}$ рівномірно обертається з частотою $\omega = 30 \text{ об/с}$. Визначити різницю потенціалів між центром і краєм диску.

4. Власна електропровідність чистого германію при 27°C дорівнює $\sigma = 2,13 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Рухливість електронів і дірок відповідно дорівнює $0,38 \text{ м}^2/(\text{Вс})$ і $0,18 \text{ м}^2/(\text{Вс})$. Визначити концентрацію носіїв струму та ширину забороненої зони. (Передекспоненційний множник $A = 2,4 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$).

Практичне заняття № 13.

КОНТАКТНІ ЯВИЩА В МЕТАЛАХ ТА НАПІВПРОВІДНИКАХ

1. Визначити контактну різницю потенціалів між міддю і платиною при $T = 800 \text{ К}$, якщо робота виходу електронів для міді $A_1 = 4,272 \text{ еВ}$, для платини $A_2 = 6,275 \text{ еВ}$. Стала термопар $\alpha = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}$.

2. Визначити за допомогою термопар температуру муфельної печі, якщо другий спай термопар знаходиться при температурі $T_2 = 1800 \text{ К}$, стрілка гальванометра, що приєднано до термопар, відхилилась на $n = 25$ поділок. Стала термопар $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}$; внутрішній опір гальванометра $r = 2 \text{ кОм}$, а ціна поділки $i = 10^{-8} \text{ А}$.

3. Термопара вісмут-залізо ($\alpha = 92 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}$) опором $R = 5 \text{ Ом}$ приєднана до гальванометра з внутрішнім опором $R_1 = 110 \text{ Ом}$. Яку силу струму покаже гальванометр, якщо один спай термопар поміщено в воду, що кипить, а другий в посудину Д'юара, в якому міститься суміш води і льоду.

3.1.2.3. Задачі для самостійного розв'язування на постійний струм

Постійний електричний струм

Сила струму

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (5.1)$$

де dq - заряд, який проходить крізь деяку поверхню за проміжок часу dt .

Для постійного струму

$$I = \frac{q}{t} \quad (5.1a)$$

Густина струму

$$j = \frac{I}{S_{\perp}} k \quad (5.2)$$

де k - одиничний вектор, напрям якого збігається з напрямом упорядкованого руху позитивних зарядів.

Густина струму в металах

$$j = en\langle u \rangle \quad (5.3)$$

де e - елементарний заряд; n - концентрація носіїв; u - середня швидкість їх упорядкованого руху.

Опір однорідного провідника сталого перерізу S

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (5.4)$$

де ρ - питомий опір; l - довжина провідника.

Залежність питомого опору від температури:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (5.5)$$

де ρ , ρ_0 - питомі опори відповідно при t і 0 °C; t - температура, °C; α - температурний коефіцієнт опору.

Опір провідників при послідовному й паралельному з'єднаннях відповідно

$$R = \sum R_i \quad \frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i} \quad (5.6)$$

Закон Ома:

а) для однорідної ділянки кола

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R} \quad (5.7)$$

б) для неоднорідної ділянки кола

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R} = \frac{U}{R} \quad (5.8)$$

в) для замкненого кола

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (5.9)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2$ - різниця потенціалів на кінцях ділянки кола; R - опір кола (або ділянки кола); U - напруга на ділянці кола; ε_{12} - ЕРС джерел струму, які входять до ділянки; ε - ЕРС усіх джерел струму кола.

Закон Ома в диференціальній формі

$$j = \sigma E \quad (5.10)$$

де σ - питома електропровідність, $\sigma = \frac{1}{\rho}$; ρ - питомий опір; E - напруженість електричного поля.

Робота струму за час t

$$A = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (5.11)$$

Потужність струму

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (5.12)$$

Кількість теплоти Q , яка виділяється на ділянці кола за час t (закон Джоуля-Ленца)

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (5.13)$$

Закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі

$$w = \sigma E^2 \quad (5.14)$$

де w - питома теплова потужність струму.

Правила Кірхгофа для розгалужених кіл:

1. Алгебрична сума сил струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулеві:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (5.15)$$

де n - кількість струмів, які сходяться у вузлі.

Струми, які входять у вузол, вважають додатними, а ті, що виходять, -від'ємними, або навпаки.

2. У будь-якому замкненому контурі, довільно обраному в розгалуженому колі, алгебрична сума добутків сил струмів на опори відповідних ділянок контуру дорівнює алгебричній сумі електрорушійних сил, що діють у цьому контурі:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^n \varepsilon_k \quad (5.16)$$

Напрямок обходу контуру (за або проти руху стрілки годинника), напрями струмів на всіх ділянках кола вибирають довільно. Струми вважаються додатними, якщо їхній напрям збігається з напрямом обходу, а протилежні цьому напрямку -від'ємними. ЕРС джерел струму вважають додатними, якщо напрям обходу збігається з напрямом збільшення потенціалу.

Опір однорідного середовища

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\varepsilon_0}{\sigma C} \quad (5.17)$$

де C - ємність конденсатора, обкладками якого є електроди.

Залежність густини струму насичення від температури (формула Річардсона-Дешмана)

$$j_n = B T^2 e^{-\frac{A}{kT}} \quad (5.18)$$

де B - емісійна стала, для чистих металів $B=602 \text{ кА}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$; A - робота виходу електрона з металу; k - стала Больцмана.

Закон Ома для електролітів

$$j = q \alpha n_0 (u_+ + u_-) E = \sigma E \quad (5.19)$$

де q - заряд іона, $q=ze$; тут z - валентність, e - елементарний заряд; α - ступінь дисоціації; n_0 - кількість молекул розчиненої речовини в одиниці об'єму розчину; u_+ , u_- - рухливості позитивних і негативних іонів; σ - питома електропровідність електроліту.

Еквівалентна електропровідність

$$\Lambda = \frac{\sigma}{\eta} \quad (5.20)$$

де η - еквівалентна концентрація, $\eta = \frac{n_0 z}{N_A}$; тут N_A - число Авогадро.

Перший закон Фарадея

$$m = klt \quad (5.21)$$

де k - електрохімічний еквівалент.

Другий закон Фарадея

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{z} \quad (5.22)$$

де F - число Фарадея, $F=9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль; A - атомна маса.

Кількість пар іонів, які щосекунди рекомбінують в одиниці об'єму газу

$$\Delta n_r = rn^2 \quad (5.23)$$

де r - коефіцієнт рекомбінації; n - кількість пар іонів у одиниці об'єму.

Умова статистичної рівноваги в газі під час несамостійного розряду;

$$\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j \quad (5.24)$$

де Δn_i - кількість пар іонів, що утворюються за секунду в одиниці об'єму під дією іонізатора; Δn_j - кількість пар іонів, які щосекунди залишають одиницю об'єму газу під дією поля.

У випадку плоских електродів

$$\Delta n_j = \frac{j}{qd} \quad (5.25)$$

де j - густина струму; q - заряд іона; d - відстань між електродами.

При малих густинах струму, який проходить у газі, має місце закон Ома

$$j = qn(u_+ + u_-)E = \sigma E \quad (5.26)$$

Дебаївський радіус екранування

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{2n_0 e^2}} \quad (5.27)$$

де n_0 - рівноважна концентрація електронів (іонів).

Умова ідеальності плазми

$$\frac{e^2 n_0^{1/3}}{4\pi \epsilon_0} \ll kT \quad (5.28)$$

Закон Ома для ділянки кола. Опір провідників

176. Електрон в атомі водню обертається навколо ядра. Визначити, який струм I він створює та швидкість v електрона на цій орбіті, якщо радіус орбіти $r=53$ пм.

177. Який заряд q пройде по провіднику, якщо сила струму рівномірно збільшується від $I_1=0$ до $I_2=5$ А протягом часу $t=10$ с?

178. Сила струму в провіднику змінюється з часом згідно з рівнянням $I=5 + 3t$, де I – сила струму, А; t - час, с. Яка кількість електрики q проходить

крізь поперечний переріз провідника за час від $t_1=3$ с до $t_2=8$ с? При якій силі постійного струму I крізь поперечний переріз провідника за цей час проходить така сама кількість електрики?

179. До амперметра, опір якого $R_a=0,27$ Ом, приєднано паралельно шунт опором $R=0,09$ Ом. Обчислити силу струму в колі, якщо амперметр показує $I=2$ А.

180. Що потрібно зробити, щоб прилад, ціна поділки якого $i_0=10$ мкА, шкала приладу має $n=100$ поділок, а внутрішній опір $r=100$ Ом, можна було використати: а) як вольтметр для вимірювання напруги до $U=100$ В; б) як амперметр для вимірювання струму до $I=1$ А?

181. Якщо вольтметр з'єднати послідовно з резистором, опір якого $R=10$ кОм, то при напрузі $U=120$ В він покаже $U_1=50$ В. Якщо його з'єднати послідовно з резистором, опір R_x якого невідомий, то при тій самій напрузі він покаже $U_2=10$ В. Визначити опір резистора R_x .

182. Яким має бути опір r (рис. 3.27), щоб опір між клемми A і B був таким, що дорівнює R_0 ? Опір R_0 вважати відомим.

183. На рис. 3.28 зображено два електричних кола, до яких входять резистори з відомими опорами R і $2R$ та резистор з невідомим опором r . При якому значенні r опори обох кіл, виміряні між точками A і B , будуть однаковими і яким буде загальний опір $R_{\text{заг}}$ кіл?

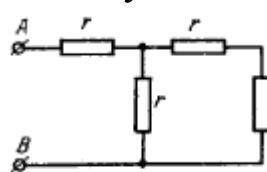


Рис. 3.27

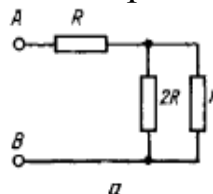
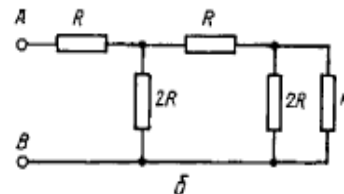


Рис. 3.28



184. Два провідники виготовлені з одного матеріалу. У скільки разів довжина одного провідника більша від довжини іншого, коли відомо, що $R_1=8R_2$, а $m_1=2m_2$?

185. Визначити опір ділянки кола між точками A і B (рис. 3.29), якщо опори $R_1=R_3=R_5=R_7=R_8=R_9=1$ Ом, $R_2=R_4=R_6=20$ Ом.

186. Визначити опір ділянки кола між точками A і B (рис. 3.30), якщо опори $R_1=R_2=R_4=R_5=1$ Ом, $R_3=R_6=12$ Ом.

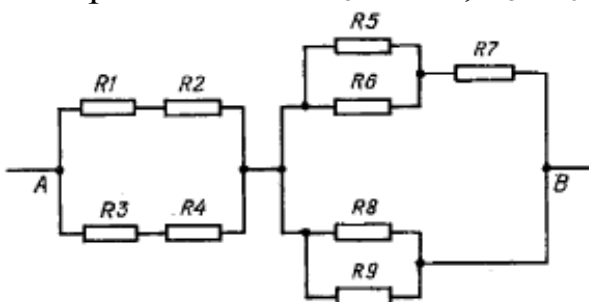


Рис. 3.29

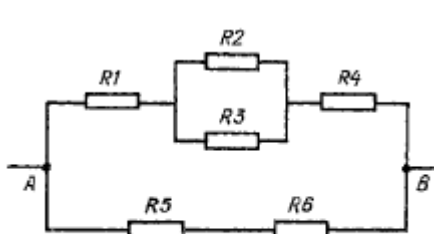


Рис. 3.30

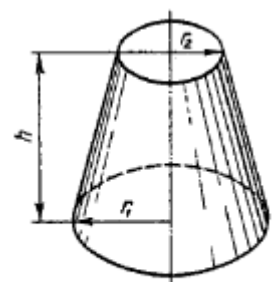


Рис. 3.31

187. У мідному провіднику, площа поперечного перерізу якого $S=0,5 \text{ см}^2$, проходить струм силою $I=1,5 \text{ А}$. З якою силою F діє електричне поле в цьому провіднику на кожний носій струму?

188. До лампи розжарювання за допомогою мідного провідника підведено струм, сила якого $I=0,2 \text{ А}$. Площа поперечного перерізу провідника $S=5 \text{ мм}^2$. Температура вольфрамової нитки діаметра $d=0,02 \text{ мм}$ під час горіння лампи $t=2\,000 \text{ }^\circ\text{С}$. Визначити напруженість електричного поля E у міді та вольфрамі.

189. На кінцях залізного провідника, довжина якого $l=1 \text{ м}$ і діаметр $d=1 \text{ мм}$, підтримується напруга $U=12 \text{ В}$. Визначити густину струму j та кількість електронів N , які проходять крізь поперечний переріз провідника за 1 с .

190. Обчислити опір R графітового провідника, що виготовлений у вигляді прямого кругового зрізаного конуса (рис. 3.31) заввишки $h=25 \text{ см}$. Радіуси його основ $r_1=15 \text{ мм}$ і $r_2=10 \text{ мм}$. Температура провідника дорівнює $20 \text{ }^\circ\text{С}$.

191. Простір між обкладками сферичного конденсатора, радіуси яких r_1 і r_2 , заповнено слабопровідною однорідною речовиною з питомим опором ρ . Визначити силу струму I виходу крізь конденсатор, якщо різниця потенціалів між обкладками U .

192. У необмеженому середовищі, питомий опір якого $\rho=10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, розміщується металева куля діаметра $d=0,1 \text{ м}$. Визначити опір R системи куля - необмежене середовище.

193. Між коаксіальними циліндричними електродами, радіуси яких $r_1=10 \text{ см}$ і $r_2=10,5 \text{ см}$, міститься провідне середовище. Питома електрична провідність матеріалу електродів є значно більшою, ніж питома електрична провідність середовища, питомий опір якого $\rho=3,9 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Визначити опір R середовища між електродами, якщо довжина їх $l=20 \text{ см}$.

194. Мідну кулю, радіус якої $r_1=5 \text{ см}$, опускають у півсферичний келих радіуса $r_2=10 \text{ см}$, наповнений водою, так, що куля і келих є концентричними. Питома електрична провідність води $\sigma=10^{-3} \text{ См/м}$. Визначити електричний опір між кулею та келихом.

195. Між двома плоскими електродами з площею перерізу $S=200 \text{ см}^2$ кожний міститься провідна речовина, питома електрична провідність якої змінюється лінійно в напрямі, перпендикулярному до електродів, від $\sigma_1=10^{-3} \text{ См/м}$ біля поверхні першого електрода до $\sigma_2=5\cdot 10^{-3} \text{ См/м}$ біля поверхні другого. Обчислити опір середовища між електродами, відстань між якими $d=5 \text{ см}$.

196. Для скорочення витрат проводів використовують землю як провідник електричного струму (заземлення ліній передач). Електричне коло можна зобразити так, як показано на рис. 3.32. Електродами є сфери радіуса $r_0=1 \text{ м}$.

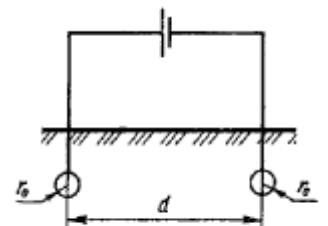


Рис. 3.32

Питома електрична провідність Землі $\sigma=10^{-2}$ См/м. Вважаючи відстань між електродами $d \ll r_0$, визначити опір R заземлення. Як залежить опір заземлення від відстані між електродами?

197. Довгий провідник круглого перерізу радіуса a виготовлений з матеріалу, питомий опір якого залежить тільки від відстані r до осі провідника за законом $\rho=\alpha/r^2$, де α - стала. Визначити опір R одиниці довжини такого провідника та напруженість електричного поля E в провіднику, при якій у ньому проходить струм I .

198. Пластины плоского конденсатора приєднані до джерела постійної напруги $U=300$ В. Пластины зближуються зі швидкістю $v=1$ мм/с. Визначити силу струму I в провідниках у момент, коли пластины перебувають на відстані $d=2$ мм одна від одної. Площа пластин $S=400$ см².

199. Конденсатор ємністю $C=1$ мкФ розряджається через резистор, опір якого $R=4$ МОм. Через який проміжок часу t від початку розряджання: а) початкова напруга U_0 на пластинах конденсатора зменшиться у 2 рази; б) початковий заряд до зменшиться в $e=2,718$ рази?

200. Плоский конденсатор, заповнений кварцом, втрачає за час $t_1=3$ хв половину свого заряду. Діелектрична проникність кварцу $\epsilon=3,75$. Враховуючи, що витікання заряду відбувається тільки крізь діелектричну прокладку, визначити питомий опір кварцу. Яка частина заряду залишиться на конденсаторі через час $t_2=7$ хв від початку розряджання?

201. Плоский конденсатор з пластинами розміру $a \times b$ ($a=2$ см), що розміщуються одна від одної на відстані $d=1$ см, приєднано до батареї з ЕРС $\epsilon=100$ В і внутрішнім опором $r=5$ Ом. У коло ввімкнено гальванометр, опором якого можна нехтувати, У конденсатор вводять зі швидкістю $v=1$ м/с уздовж сторони b скляну пластинку завтовшки d . Діелектрична проникність скла $\epsilon=5$. Яку силу струму I покаже гальванометр під час введення скляної пластинки у конденсатор?

Закон Ома для повного кола. Правила Кірхгофа

202. Два джерела струму, електрорушійні сили яких $\epsilon_1=60$ В і $\epsilon_2=35$ В, з'єднані між собою так, як показано на рис. 3.33. Визначити різницю потенціалів між точками a і b в обох випадках. Відношення внутрішніх опорів джерел $r_2/r_1=1,5$.

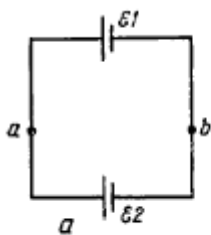


Рис. 3.33

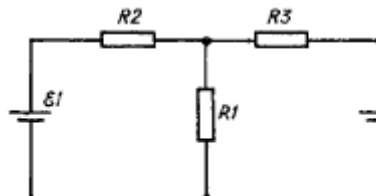
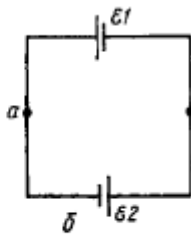


Рис. 3.34

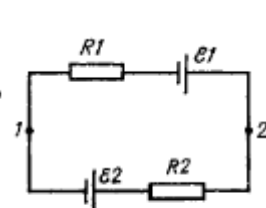


Рис. 3.35

203. У колі, зображеному на рис. 3.34, електрорушійні сили $\varepsilon_1=1,5$ В, $\varepsilon_2=1$ В, опори $R_1=100$ Ом, $R_2=50$ Ом і $R_3=80$ Ом. Обчислити силу струму, який проходить крізь резистор R_1 .

204. Визначити різницю потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ між точками 1 і 2 схеми (рис. 3.35), якщо опори $R_1=10$ Ом, $R_2=20$ Ом, електрорушійні сили $\varepsilon_1=5$ В, $\varepsilon_2=2$ В, Внутрішніми опорами джерел струму нехтувати.

205. Джерела струму з різними ЕРС з'єднані, як зображено на рис. 3.36. Електрорушійні сили джерел пропорційні їх внутрішнім опорам $\varepsilon=\alpha r$, де α - стала. Опором провідників нехтувати. Визначити струм I у колі та різницю потенціалів між точками А і В.

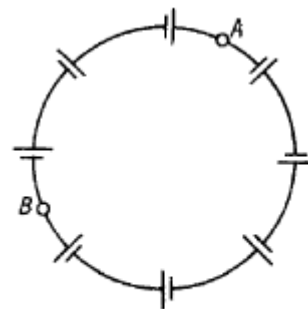


Рис. 3.36

206. У схемі (рис. 3.37) електрорушійна сила $\varepsilon=5$ В, опори $R_1=4$ Ом, $R_2=6$ Ом. Внутрішній опір джерела струму $r=0,1$ Ом. Визначити сили струмів, що проходять крізь резистори R_1 і R_2 .

207. У схемі (рис. 3.38) електрорушійні сили $\varepsilon_1=1,5$ В, $\varepsilon_2=2$ В, $\varepsilon_3=2,5$ В, опори $R_1=10$ Ом, $R_2=20$ Ом, $R_3=30$ Ом. Внутрішнім опором джерел струму нехтувати. Визначити сили струмів у всіх ділянках кола та різницю потенціалів $\varphi_A - \varphi_B$ між точками А і В.

208. Чому дорівнює опір дрютяного каркаса у вигляді прямокутника зі сторонами a і b та діагоналлю, якщо струм проходить від точки А до точки В (рис. 3.39)? Опір одиниці довжини дроту дорівнює γ . Визначити також опір каркаса, коли струм проходить від точки С до точки В.

209. Електричне коло складається з батареї, електрорушійна сила якої $\varepsilon=3$ В, внутрішній опір $r=1$ Ом, конденсатора ємністю $C=2$ мкФ і чотирьох резисторів $R_1=1$ Ом, $R_2=2$ Ом, $R_3=3$ Ом, $R_4=4$ Ом (рис. 3.40). Визначити заряд на обкладках конденсатора. Опором з'єднувальних провідників нехтувати.

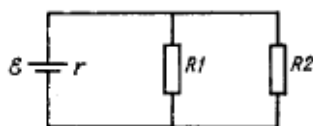


Рис. 3.37

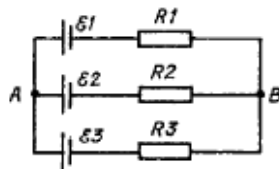


Рис. 3.38

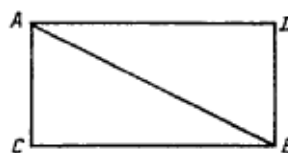


Рис. 3.39

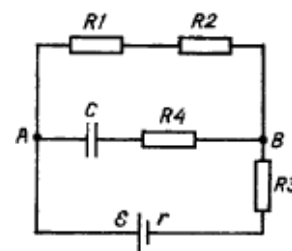


Рис. 3.40

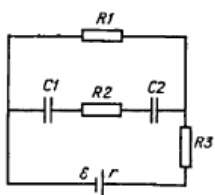


Рис. 3.41

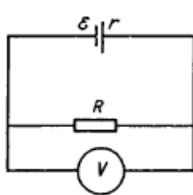


Рис. 3.42

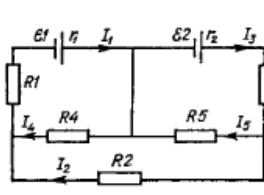


Рис. 3.43

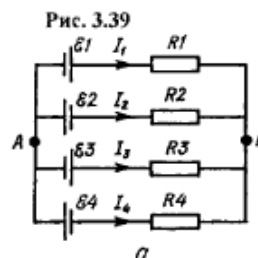
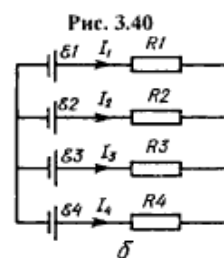


Рис. 3.44



210. До якої напруги зарядяться конденсатори C_1 і C_2 приєднані до джерела (рис. 3.41), за умови, коли електрорушійна сила $\varepsilon=2,2$ В, опори $r=0,4$ Ом, $R_1=3$ Ом, $R_2=1$ Ом, $R_3=5$ Ом, ємності $C_1=2$ мкФ, $C_2=3$ мкФ?

211. За допомогою вольтметра, внутрішній опір якого $R_{\text{вн}}=200$ Ом, вимірюють напругу на резисторі. Опір резистора $R=10$ Ом (рис. 3.42). Внутрішній опір джерела ЕРС $r=1$ Ом. Обчислити, яку відносну похибку δ допускають під час вимірювання, вважаючи, що вольтметр має нескінченно великий опір, тобто його вмикання не змінює сили струму в колі.

212. Встановити розподіл струмів у колі (рис. 3.43), якщо електрорушійні сили $\varepsilon_1=12$ В, $\varepsilon_2=8$ В, опори $r_1=4$ Ом, $r_2=3$ Ом, $R_1=20$ Ом, $R_2=40$ Ом, $R_3=29$ Ом, $R_4=8$ Ом, $R_5=16$ Ом.

213. На рис. 3.44 зображено два розгалужених кола постійного струму. Визначити значення струмів, що проходять крізь резистори в обох колах, коли електрорушійні сили $\varepsilon_1=1$ В, $\varepsilon_2=2$ В, $\varepsilon_3=3$ В, $\varepsilon_4=4$ В, опори $R_1=1$ Ом, $R_2=2$ Ом, $R_3=3$ Ом, $R_4=4$ Ом. Внутрішнім опором джерел струму та опором з'єднувальних провідників нехтувати. Як зміняться струми у колі (рис. 3.44, а), якщо роз'єднати провідники у точках А і В?

Робота і потужність електричного струму

214. До кінців свинцевого дроту завдовжки $l=5$ см і діаметра $d=0,2$ мм прикладена напруга $U=100$ В. Через який проміжок часу t дріт почне плавитись? Точка плавлення свинцю $T_{\text{пл}}=327$ °С. Початкову температуру дроту вважати такою, що дорівнює нулеві. Зміною теплоємності свинцю під час нагрівання і розсіюванням теплоти в навколишнє середовище нехтувати.

215. Гроза хмара перебуває на висоті $h=500$ м від поверхні Землі. Визначити енергію розряду W між Землею та хмарою, якщо за час $t=0,1$ с пройшов струм, сила якого $I=200$ А, Напруженість електричного поля, яке вважається однорідним, $E=2 \cdot 10^5$ В/м.

216. Визначити роботу A електричних сил і кількість теплоти Q , що виділяється протягом часу $t=1$ с: а) в акумуляторі, який заряджається струмом $I_1=1$ А при нарузі на полюсах акумулятора $U_1=2$ В, коли ЕРС акумулятора $\varepsilon_1=1,3$ В; б) у батареї акумуляторів, яка дає на зовнішній споживач струм $I_2=1$ А при різниці потенціалів на полюсах акумулятора $U_2=2$ В, коли ЕРС батареї $\varepsilon_2=2,6$ В.

217. З яким коефіцієнтом корисної дії η працює свинцевий акумулятор, ЕРС якого $\varepsilon=2,15$ В, якщо в зовнішньому колі з опором $R=0,25$ Ом проходить струм $I=5$ А? Яку максимальну корисну потужність P_{max} може дати акумулятор у зовнішньому колі? Як при цьому зміниться ККД?

218. Який зовнішній опір R треба підключити до $n=5$ однакових послідовно з'єднаних джерел (ЕРС кожного $\varepsilon=1,5$ В і внутрішній опір $r=0,3$ Ом), щоб потужність, яка віддається в зовнішнє коло (корисна потужність), була максимальною? Якими при цьому будуть сила струму I у колі і повна потужність P батареї?

219. Коли сила струму $I=5$ А, то зовнішнє коло джерела споживає потужність $P_1=9,5$ Вт, якщо ж опір зовнішнього кола $R=0,225$ Ом, то споживана потужність $P_2=14,4$ Вт. Визначити максимальну потужність P_{\max} в зовнішньому колі. Чому дорівнюватиме при цьому ККД η джерела?

220. До затискачів джерела струму, внутрішній опір якого $r=1$ Ом, під'єднують два однакових резистори з опорами $R=0,5$ Ом кожний. Спочатку резистори вмикають у коло послідовно, а потім - паралельно. Визначити відношення потужностей, які споживаються в зовнішньому колі у першому і другому випадках.

221. Напруга на шинах електростанції $U=10$ кВ, відстань від споживача $l=500$ км. Станція передає споживачеві потужність $P=100$ кВт, причому втрата напруги не повинна перевищувати $\eta=5\%$. Обчислити: силу струму I в проводах; площу S їх поперечного перерізу; масу m_1 міді, яка потрібна для проведення проводки. Як зміниться необхідна кількість m_2 міді, якщо напругу на вході лінії збільшити у $n=10$ разів?

222. Обчислити силу струму в підвідних проводах під час короткого замикання, якщо на двох плитках з опорами $R_1=200$ Ом і $R_2=500$ Ом при вмиканні їх по черзі виділяється однакова потужність $P=200$ Вт.

223. Сила струму в провіднику, опір якого $R=100$ Ом, рівномірно збільшується від нуля до $I_{\max}=10$ А протягом часу $t_1=30$ с. Визначити кількість теплоти Q , яка виділяється за цей час у провіднику.

224. Визначити кількість теплоти Q , що виділяється в провіднику, опір якого $R=10$ Ом, за час $t=30$ с, якщо: а) сила струму рівномірно спадає від $I_0=3$ А до $I=0$; б) напруга на провіднику змінюється за законом $U=k\sqrt{t}$, де $k=2$ В \cdot с $^{-1/2}$.

225. Визначити питому теплову потужність w струму, якщо довжина провідника $l=0,2$ м, а на його кінцях підтримується різниця потенціалів $U=4$ В. Питомий опір провідника $\rho=1$ мкОм \cdot м.

226. Для розжарювання нитки електричної лампи потрібна напруга U_1 . Внаслідок випаровування діаметр нитки зменшився на $\alpha\%$. Якою має бути напруга U_2 , щоб температура нитки не змінилась? Тепловіддача пропорційна площі поверхні нитки.

227. У мідному провіднику завдовжки $l=2$ м, площа поперечного перерізу якого $S=0,4$ мм 2 , проходить струм. При цьому кожну секунду виділяється $Q=0,35$ Дж теплоти. Скільки електронів n проходить за час $t=1$ с крізь поперечний переріз цього провідника?

228. Скільки витків N нікелінового дроту потрібно намотати на фарфоровий циліндр діаметра 1,5 см, щоб виготовити кип'ятильник, в якому протягом часу 5 хв закипить вода при початковій температурі $T=283$ К? Маса води 200 г, діаметр дроту 0,2 мм, напруга 220 В, Коефіцієнт корисної дії 60 %.

229. Якщо напруга в електричній мережі $U_1=120$ В, то вода в електричному чайнику закипає через $t_1=20$ хв. Якщо напруга в колі $U_2=110$ В, то при тій самій початковій температурі вода закипить через $t_2=28$ хв. Вважаючи, що втрати теплоти від чайника в навколишнє середовище пропорційні часові нагрівання, визначити, через який час t_3 закипить вода в чайнику, якщо напруга в колі $U_3=100$ В.

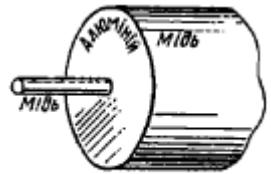


Рис. 3.45

230. Струм проходить від мідної трубки радіуса $r=2$ мм до мідної трубки радіуса $R=4$ см вздовж плоскої алюмінієвої фольги завтовшки $d=0,1$ мм (рис. 3.45). Яка кількість теплоти Q виділиться в алюмінієвій фользі за час $t=0,5$ с, якщо проходитиме струм, сила якого $I=5$ А?

231. Конденсатор ємністю $C=5$ мкФ приєднано до джерела постійного струму, напруга якого $U=200$ В (рис. 3.46). Потім перемикач Π переводиться з положення 1 в положення 2. Визначити кількість теплоти що виділяється в резисторі R_1 . Опір $R_1=500$ Ом, опір $R_2=300$ Ом. Опором провідників, за допомогою яких з'єднують елементи кола, нехтувати.

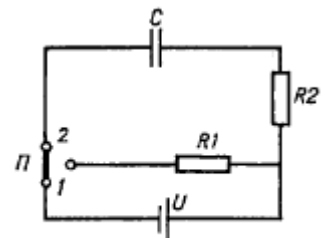


Рис. 3.46

Струм у вакуумі, електролітах і газах

232. Визначити силу струму насичення I_n в електронній лампі з вольфрамовим катодом завдовжки $l=3$ см і діаметра $d=0,1$ мм, якщо температура $T=2700$ К. Емісійна стала для вольфраму $B=60$ А/(см²·К²), робота виходу електрона з вольфраму $A=4,54$ еВ.

233. Чому дорівнює робота виходу електронів із металу, якщо підвищення температури нитки розжарювання, зробленої із цього металу, від 2000 К до 2001 К збільшує силу струму насичення в електронній лампі на 1 %?

234. У скільки разів струм насичення термоелектронної емісії з торійованого вольфрамового катода при робочій температурі $T=1800$ К буде більшим, ніж струм насичення з чистого вольфрамового катода при тій самій робочій температурі? Емісійна стала та робота виходу електрона для чистого і торійованого вольфраму відповідно $B_1=60$ А/(см²·К²), $A_1=4,54$ еВ і $B_2=3$ А/(см²·К²), $A_2=2,63$ еВ.

235. На аноді двохелектродної лампи протягом часу $t=1$ год її роботи виділяється кількість енергії $W=63$ Дж. Струм насичення в лампі $I_n=6,3$ мА.

Вважаючи, що теплота виділяється тільки за рахунок кінетичної енергії електронів, визначити швидкість v електронів, які вдаряються об анод, та кількість електронів n_0 , що вилітають з катода за одну секунду.

236. Пучок електронів в осцилографі прискорюється анодною напругою $U_a=500$ В. Обчислити відхилення s променя на екрані, якщо напруга на відхильних пластинах $U=30$ В, довжина їх $l=5$ см, відстань між ними $d=1$ см, а відстань між відхильними пластинами і екраном $L=10$ см.

237. Визначити коефіцієнт дисоціації α водного розчину азотної кислоти, концентрація якої $c=0,064$ г/см³, якщо питомий опір розчину $\rho=32$ мОм·м, рухливість позитивних іонів $u_+=3,26 \cdot 10^{-7}$ м²/(В·с), а негативних $u_-=6,4 \cdot 10^{-8}$ м²/(В·с).

238. Визначити питомий опір ρ водного розчину хлористого калію KCl, концентрація якого $c=0,1$ г/см³, коли відомо, що коефіцієнт дисоціації цього розчину $\alpha=0,77$, рухливість позитивних іонів $u_+=6,7 \cdot 10^{-8}$ м²/(В·с), а негативних $u_-=6,8 \cdot 10^{-8}$ м²/(В·с).

239. Яку кількість електроенергії W потрібно витратити для одержання алюмінію масою $m=2$ кг, якщо електроліз відбувається при напрузі $U=15$ В, $\eta=75$ %? Атомна маса алюмінію $A=27$ г/моль.

240. Електролітична ванна, наповнена розчином мідного купоросу, з'єднана з батареєю акумуляторів, електрорушійна сила якої $\varepsilon=4$ В і внутрішній опір $r=0,1$ Ом. Визначити: масу m міді, яка виділяється за 10 хв, якщо ЕРС поляризації $\varepsilon_{\text{пол}}=1,5$ В, а опір розчину $R_p=0,5$ Ом; відношення заряду q іона міді до його маси m_0 . Мідь є двохвалентною.

241. Під час електролізу розчину розкладається мідний купорос, маса якого $m=4,77$ г, за час $t=1$ год. Визначити кількість N іонів міді, які нейтралізуються щосекунди на аноді. Який заряд q кожного іону?

242. Дві електролітичні ванни з'єднані послідовно. У першій ванні міститься розчин хлористого заліза FeCl_2 , а в другій – розчин хлорного заліза FeCl_3 . Визначити маси заліза й хлору, що виділяються в кожній ванні, під час проходження електричного заряду $Q=9,65 \cdot 10^7$ Кл.

243. Під час електролізу розчину сірчаної кислоти витрачається потужність $P=37$ Вт. Визначити опір R електроліту, якщо за час $t=500$ хв виділяється водень, маса якого $m=0,3$ г.

244. Визначити еквівалентну концентрацію η , еквівалентну електропровідність Λ і коефіцієнт дисоціації α водного розчину хлористого калію KCl. Концентрація розчину $c=0,1$ г/см³. Питомий опір такого розчину $\rho=7,4 \cdot 10^{-2}$ Ом·м при 18 °С, а рухливості іонів K^+ і Cl^- при цій температурі відповідно $u_+=6,7 \cdot 10^{-8}$ м²/(В·с), $u_-=6,8 \cdot 10^{-8}$ м²/(В·с).

245. Дві електролітичні ванни з'єднані послідовно. У першій ванні виділився цинк, маса якого $m_1=3,9$ г, у другій за той самий час – залізо, маса якого $m_2=2,24$ г. Атомні маси цинку й заліза відповідно $A_1=65$ г/моль, $A_2=56$ г/моль. Валентність цинку $z_1=2$. Яка валентність z_2 заліза?

246. Дві електролітичні ванни з'єднані послідовно. Залежність швидкості виділення металів на електродах від часу графічно зображена на рис. 3.47. Відомо, що протягом часу $t=10$ хв виділилася мідь, маса якої $m_1=50$ г, і невідомий метал, маса якого $m_2=150$ г. Визначити електрохімічний еквівалент k невідомого металу. Встановити залежність струму від часу.



Рис. 3.47

247. Найчистіша вода при температурі 18°C має питому електропровідність $\sigma=3,8 \cdot 10^{-2}$ $1/(\text{См} \cdot \text{см})$. Вважаючи, що електропровідність води зумовлена дисоціацією молекули води H_2O на іони H^+ і $(\text{OH})^-$, встановити ступінь дисоціації α води при цій температурі, якщо рухливості іонів H^+ і $(\text{OH})^-$ відповідно $u_+=3,26 \cdot 10^{-3}$ $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $u_-=1,80 \cdot 10^{-3}$ $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

248. Обчислити рівноважну концентрацію n іонів у сухому атмосферному повітрі, якщо в ньому під впливом космічного випромінювання та залишків радіоактивних речовин, що наявні в земній корі, щосекунди виникає в середньому $\Delta n_i=6,4$ пари іонів у 1 см^3 , а коефіцієнт рекомбінації $r=1,6 \cdot 10^{-6}$ $\text{см}^3/\text{с}$.

249. Визначити густину струму провідності j в атмосфері, якщо концентрація одновалентних іонів, які зумовлюють провідність, $n=10^9$ м^{-3} . Напруженість електричного поля Землі $E=130$ В/м . Рухливість позитивних іонів $u_+=1,37$ $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а негативних $u_-=1,89$ $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

250. У сухому атмосферному повітрі проходить струм, густина якого $j=10^{-20}$ А/см^2 , відстань між електродами $d=3$ см , рівноважна концентрація іонів $n=10^2$ см^{-3} , коефіцієнт рекомбінації $r=1,6 \cdot 10^{-6}$ $\text{см}^3/\text{с}$. Чи виконується в цьому разі закон Ома? Іони вважати однозарядними.

251. Площа електродів іонізаційної камери $S=100$ см^2 , відстань між ними $d=6,5$ см . Іонізатор створює у 1 см^3 щосекунди $\Delta n_i=10^9$ $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ однакових іонів кожного знаку. Коефіцієнт рекомбінації $r=10^{-6}$ $\text{см}^3/\text{с}$. Рухливості іонів $u_+=u_-=1$ $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Яка найбільш можлива кількість n_0 пар іонів у 1 см^3 камери? Який струм I проходить між електродами іонізаційної камери, якщо до електродів прикладена різниця потенціалів $U=20$ В ? Яку частку струму насичення I_n становить визначений струм? Через який час t після припинення дії іонізатора кількість іонів n_1 внаслідок рекомбінації зменшиться у 2 рази?

252. Електрон влітає в однорідне електричне поле проти напрямку його напруженості. Пройшовши різницю потенціалів $U=6$ В , він стикається з атомом водню. Якою має бути початкова швидкість електрона, щоб іонізувати атом водню? Енергія іонізації атома водню $\varepsilon_{i0}=2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж .

253. Іонізований газ містить електрони, іони та нейтральні молекули. Внаслідок дії зовнішнього електричного поля електрони та іони,

прискорюючись, збільшують свою енергію й під час зіткнення з нейтральною молекулою можуть її іонізувати. Які частинки – електрони чи іони – ефективніше іонізують газ?

254. Чи можна вважати, що простір між електродами люмінесцентної лампи заповнений плазмою?

255. Чи можна розглядати сукупність електронів провідності та іонів металу як ізотермічну плазму?

256. Чому одна з характеристик плазми називається радіусом екранування?

257. Посудину з лінійними розмірами $l=10$ см заповнено газом, який містить однозарядні іони обох знаків. Концентрація іонів $n=10^8$ м⁻³ при температурі $T=1\,000$ К. Чи можна вважати цей газ плазмою?

258. У плазмі тліючого розряду електронна температура $T=5\cdot 10^4$ К. Чи буде ця плазма ідеальною, якщо її тиск $p=10^3$ Па? Вважати, що стан плазми описується рівнянням стану класичного ідеального газу.

3.2. Змістовий модуль № 2. Магнетизм

3.2.1. Електромагнетизм

3.2.1.1. Вказівки до розв'язку задач з електромагнетизму

Завданням даного розділу є визначення основних силових і енергетичних параметрів магнітного поля *індукції* \mathbf{B} , *напруженості* \mathbf{H} , *магнітного потоку* Φ та встановлення взаємозв'язку і характеру взаємодії магнітного поля з рухомими зарядами (струмами) в залежності від середовища, в якому відбувається взаємодія.

Характер поля того самого електричного заряду залежить від того, в якій системі відліку ми розглядаємо процес, у рухомій чи нерухомій відносно даного заряду.

Для кількісної характеристики магнітного поля використовується фізична величина, яка називається *індукцією магнітного поля* або *вектором індукції* \mathbf{B} . Вектор \mathbf{B} напрямлений вздовж прямої, що співпадає з напрямом магнітного поля і утворює з векторами \mathbf{Idl} , $d\mathbf{F}$ правогвинтову трійку векторів. Індукція магнітного поля є силовою характеристикою і враховує також матеріальні властивості середовища, в якому існує магнітне поле.

Як силова характеристика магнітного поля у вакуумі використовується вектор \mathbf{H} , який називається *напруженістю магнітного поля*. Вектори \mathbf{B} і \mathbf{H} зв'язані між собою співвідношенням $\mathbf{B}=\mu\mu_0\mathbf{H}$.

Зручним для визначення напрямку векторів \mathbf{B} і \mathbf{H} є правило свердлика, за яким поступальний правогвинтовий рух свердлика співпадає з напрямком струму, а напрям магнітного поля співпадає з рухом кінця

ручки свердлика, тобто вектори \mathbf{B} і \mathbf{H} є дотичними до кола, що описують кінці ручки свердлика.

Типові задачі, що враховують процеси в магнітному полі, можна об'єднати в такі групи:

- Обчислення параметрів, як характеризують магнітне поле, створене постійними магнітами, або постійним струмом в провідниках довільної форми.

- Визначення параметрів процесу взаємодії магнітного поля з рухомими зарядженими частинками.

- Розрахунок силових та енергетичних закономірностей взаємодії провідників зі струмом довільної форми з магнітним полем.

Взаємодія магнітних полів.

При розв'язуванні задач, що віднесені до першої групи, слід зауважити, що обчислення параметрів магнітного поля в основному будується на законі Біо-Савара-Лапласа. Задачі можуть бути прямими і оберненими, де необхідно визначити магнітну індукцію або напруженість магнітного поля, що викликається постійним струмом, який протікає в різних за формою провідниках, або значення величини сили струмів, що обумовлюють існування магнітних полів.

Складність задач може полягати в наявному представленні необхідних для розв'язку задачі параметрів, або пошуку параметрів, які можна розрахувати лише шляхом використання додаткових фізичних закономірностей і формул.

В попередніх розділах розглядалися властивості статичних, незмінних в часі електричних і магнітних полів. В даному розділі розглядаються процеси динамічних електромагнітних взаємодій, що зумовлює цілий ряд якісно нових властивостей полів і їх закономірностей. В основі електродинаміки змінних полів лежить фундаментальний закон електромагнітної індукції, відкритий у 1931 році англійським вченим М.Фарадеєм. Суть цього закону полягає у виникненні струму в довільному провідниковому контурі при зміні магнітного потоку, що пронизує цей контур. Такий струм називається *індукційним*. Практично індукційний струм у замкненому контурі може бути створений під час руху провідникового контуру в магнітному полі, під час руху магніту відносно замкненого провідникового контуру і під час зміни струму в котушці, яка створює магнітне поле. Наряду з цим розглядають два типи індуктивних явищ в залежності від способу виникнення індукційного струму в провіднику:

- 1) явище самоіндукції;
- 2) явище взаємоіндукції.

В першому випадку навколо провідника з струмом виникає магнітне поле, яке створює певний магнітний потік через власний контур

провідника. Тому в замкненому контурі, в якому змінюється струм, виникає додатковий, індукційний струм. Явище виникнення індукційного струму в провіднику внаслідок зміни магнітного потоку, викликаного зміною струму в цьому ж провіднику, називається самоіндукцією, що є окремим випадком загального явища електромагнітної індукції.

Якщо розмістити провідні контури чи котушки з струмом так, що магнітні потоки кожної з них хоча б частково перетинають витки сусідніх, то між ними виникає взаємна індукція. При цьому ЕРС у кожному контурі виникає не тільки за рахунок зміни потоку індукції магнітного поля, створеного струмом даного контуру (явище самоіндукції), але й за рахунок зміни потоку індукції магнітного поля під дією струмів, які протікають в сусідніх контурах (явище взаємної індукції). Явище взаємної індукції теж є окремий випадок загального явища електромагнітної індукції, і полягає в наведенні ЕРС індукції в провідниках, які знаходяться поблизу інших провідників, струми в яких змінюються з часом.

Окрім того змінні струми, що виникають в провідниках внаслідок описаних процесів залежать від властивостей самих провідників і середовищ, в яких ці процеси здійснюються.

Типові задачі, що пояснюються процесами електромагнітної індукції можна об'єднати в такі групи:

- Визначення електрорушійної сили індукції або самоіндукції, або інших фізичних параметрів пов'язаних з явищем електромагнітної індукції.
- Визначення параметрів змінного електричного струму і інших фізичних параметрів, які характеризують дію змінного струму в колах, що мають активні і реактивні опори.
- Розв'язок задач, що описують електромагнітні коливання та виникнення та поширення електромагнітних хвиль.

При розв'язуванні задач, віднесених до першої групи, слід зауважити, що для визначення ЕРС індукцій за законом Фарадея потрібно обчислити зміну потоку індукцій через площину контуру, незалежно від того, чим ця зміна викликана: зміною форми контуру, переміщенням контуру в неоднорідному полі чи зміною магнітної індукції поля з часом.

Маючи на увазі, що зміна потоку магнітної індукції може бути викликано зміною струму в контурі, аналогічним способом можна визначати величину ЕРС самоіндукції.

3.2.1.2. Практичні заняття

Практичне заняття № 14.

ІНДУКЦІЯ І НАПРУЖЕНІСТЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.

1. По провіднику протікає струм силою 2 А. Визначити магнітну індукцію поля, створеного цим струмом в точці, що знаходиться на

перпендикулярі до середини відрізка провідника довжиною $l=20\text{ см}$ на відстані $a=20\text{ см}$ від нього.

2. По двох довгих прямолінійних провідниках протікає струм $I=10\text{ А}$. Відстань між провідниками $r=5\text{ см}$. Визначити напруженість і магнітну індукцію поля, що утворене струмами в точці, яка рівновіддалена від провідників, за таких умов: а) струм протилежного напрямку, якщо провідники розміщені в просторі паралельно та під кутом 60° або 90° ; б) струми одного напрямку.

3. Визначити напруженість магнітного поля в центрі однієї з основ соленоїда довжиною $L=10\text{ см}$ і діаметром $d=4\text{ см}$, якщо він має $N=150$ витків і по них проходить струм $I=0,5\text{ А}$.

4. Щільно укладені одним шаром 30 витків тонкого дроту утримуються на каркасі у вигляді півсфери радіусом $R=10\text{ см}$. Визначити величину струму, який протікає по провіднику, якщо магнітна індукція поля в центрі сфери становить $B=1,26 \cdot 10^{-4}\text{ Тл}$.

5. По циліндричному провіднику діаметром $0,4\text{ см}$ за $0,3 \cdot 10^{-8}\text{ с}$ переноситься сторонніми силами, рівномірно розподіленими по перерізу провідника, заряди, сумарна величина яких $0,6\text{ нКл}$. Визначити напруженість магнітного поля в точках на відстанях $r_1=0,1\text{ см}$ і $r_2=4\text{ см}$ від осі провідника.

Практичне заняття № 15.

ВЗАЄМОДІЯ СТРУМІВ. ЗАКОН АМПЕРА. СИЛА ЛОРЕНЦА.

1. Електрон з дуже малою початковою швидкістю проходить однорідному електричному полі з різницею потенціалів 1000 В . Після цього він потрапляє в перпендикулярне до напрямку його напрямку магнітне поле. Необхідно визначити ларморівський радіус руху електрона.

2. Протон, набувши швидкості $v=2 \cdot 10^4\text{ м/с}$, влітає в магнітне поле під кутом 30° до напрямку вектора напруженості поля $H=2,4 \cdot 10^3\text{ А/м}$. Визначити крок гвинтової лінії руху протона.

3. Відрізок шини і провідника, з'єднані між собою діелектричними пружинами, і розміщені в вертикальній площині. Якщо по шині і провіднику не проходить струм, і відстань між ними дорівнює h . Визначити відстань між шиною і провідником, якщо по них відповідно проходять струми I_1 і I_2 . Вважати, що провідник не зміщується від вертикального положення. Коефіцієнт пружності кожної пружини k , а довжина провідника L .

4. Визначити дію прямого нескінченного струму I_1 на коловий контур, вздовж якого тече струм силою I_2 . Радіус контура R , а відстань його центра від нескінченного струму d . Коловий струм I_2 та струм I_1 знаходяться в одній площині.

5. По кільцю діаметром $d=0,1$ м із свинцевого провідника площею перерізу $S=0,7$ мм² проходить струм силою $I=2$ А. Чи розірветься кільце в перпендикулярному магнітному полі індукцією $B=0,2$ Тл, якщо при температурі, до якої нагрівся провідник при проходженні струму, його міцність на розрив $p_0=2 \cdot 10^6$ Н/м.

Практичне заняття № 16.

МАГНІТНИЙ ПОТІК. РОБОТА ПО ПЕРЕМІЩЕННЮ ПРОВІДНИКА ІЗ СТРУМОМ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ.

1. Плоский квадратний контур з стороною $a=10$ см, вздовж якого тече струм $I=100$ А, вільно встановився в однорідному магнітному полі індукцією $B=1$ Тл. Визначити роботу зовнішніх сил при повороті контуру відносно осі, яка проходить через середини протилежних сторін контуру, на кут: 1) $\alpha_1=\pi/2$. і 2) $\alpha_2=0,05$ рад. При повертанні контуру сила струму в ньому не змінюється.

2. Поруч з довгим прямим проводом MN, по якому проходить струм силою I , розташована квадратна рамка зі стороною l , по якій проходить струм силою I' . Рамка лежить в одній площині з проводом так, що найближча сторона рамки знаходиться на відстані a_0 від проводу. Визначити магнітну силу, що діє на рамку, та роботу цієї сили по переміщенню рамки за межі поля. Струми I та I' весь час підтримуються сталими.

Практичне заняття № 17.

МАГНІТНЕ ПОЛЕ В РЕЧОВИНІ. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.

1. На сталюму намагніченому тороїді, середній діаметр якого $d=0,3$ м і площа поперечного перерізу $S=1,6 \cdot 10^{-4}$ м², намотана обмотка, що містить $N=800$ витків. Коли по обмотці пустили струм силою $I=1,8$ А, чутливий гальванометр з опором $R=0,8$ Ом зафіксував відхилення, що відповідає проходженню заряду $q=0,24$ мКл. Визначити напруженість поля H , магнітну індукцію B всередині кільця, намагніченість кільця J та магнітну проникність сталі μ .

2. При вимиканні струму в обмотці тороїда, описаного в попередній задачі, через гальванометр пройшов заряд $q'=80$ мКл. Визначити залишкову намагніченість J' сталюого кільця та залишкові напруженість H' і індукцію B' магнітного поля всередині кільця після зникнення струму в обмотці.

3. На стержень з немагнітного матеріалу завдовжки $l=50$ см і площею поперечного перерізу $S=2$ см² намотано в один шар провідник так, що на кожен сантиметр довжини стержня припадає 20 витків. Визначити енергію магнітного поля провідника, якщо сила струму в ньому $I=0,5$ А.

4. Визначити об'ємну густину енергії магнітного поля в повітрі на відстані $a=1$ м від дуже довгого провідника, по якому теча струму силою $I=10$ А.

Практичне заняття № 18.
ЗАКОН ФАРАДЕЯ-МАКСВЕЛЛА. ІНДУКТИВНІСТЬ,
САМОІНДУКЦІЯ.

1. Визначити ЕРС індукції в стержні довжиною l , який переміщується паралельно самому собі в однорідному магнітному полі з швидкістю v . Магнітне поле викликане проходженням колового струму і є перпендикулярним до стержня.

2. Визначити струм індукції рамки площею $S=0,1$ м² і активним опором $R=0,5$ Ом, що протягом $0,4$ с повертається в магнітному полі Землі ($B=5 \cdot 10^{-5}$ Тл) з одного в друге можливі крайні положення

3. Визначити різницю потенціалів між кінцями стержня довжиною $l=0,4$ м який обертається відносно одного із своїх кінців з кутовою швидкістю $\omega=10$ с⁻¹ в магнітному полі індукцією $B=10^{-3}$ Тл, яке перпендикулярне до площини обертання стержня.

4. Визначити коефіцієнт самоіндукції тороїда довжиною $l=0,5$ м площею перерізу $S=0,1$ м² і числом витків $N=3000$. Магнітна проникність сердечника соленоїда $\mu=2$.

5. По довгому соленоїду з намагніченим осердям перерізом $S=0,5$ см², що містить $N=1200$ витків, проходить струм силою $I=2$ А. Індукція магнітного поля в центрі соленоїда $B=10$ мТл. Визначити його індуктивність.

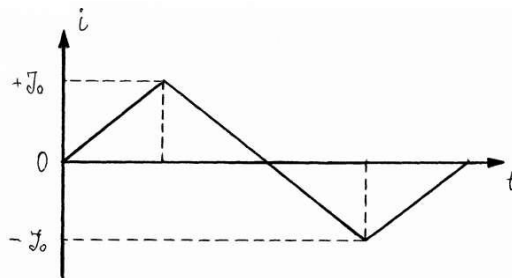
6. Котушка має опір $R=8$ Ом, індуктивність $L=0,2$ Гн. Через який час після вмикання котушки в електричне коло в ній встановиться така сила струму, що дорівнює половині повної сили струму, що встановиться через тривалий час?

7. Електричне коло складається з котушки, індуктивність якої $L=0,2$ Гн, опір якої $R=1,6$ Ом та джерела струму. З кола одночасно вимикають джерело струму і накоротко замикають котушку. У скільки разів зменшиться сила струму в котушці через $t=0,05$ с?

Практичне заняття № 19.
ЗМІННИЙ СТРУМ.

1. Визначити ефективну напругу генератора змінного струму при наявності двох синусоїдальних напруг з частотою $\nu_1=50$ Гц і амплітудою $U_1=170$ В та частотою $\nu_2=150$ Гц і амплітудою $U_2=20$ В.

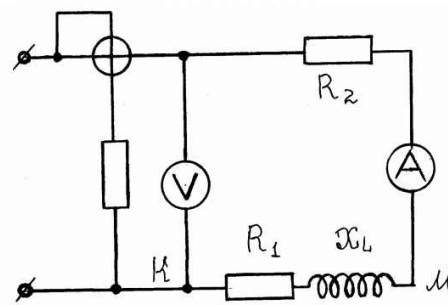
2. Визначити співвідношення між максимальним, ефективним і середнім значенням сили змінного струму, якщо зміна сили струму відбувається так, як показано на графіку.



3. Визначити питомий опір діелектрика, який має діелектричну проникність $\varepsilon=2,8$ і використаний як ізолятор в конденсаторі. Конденсатор при частоті змінного струму $\nu=50$ Гц розсіює деяку потужність з коефіцієнтом потужності $\cos\varphi=0,1$.

4. Визначити амплітудні значення сили, що діє на мембрану телефону, при проходженні по обмотці котушок з магнітним осердям струму $I=I_0\sin\omega t$, якщо амплітудне значення струму $I_0=2\cdot 10^{-4}$ А, індукція в повітряному прошарку між мембраною і котушками при відсутності струму в обмотці $B_0=8\cdot 10^{-2}$ Тл, площа перетину кожного з магнітних наконечників $S=15$ мм², число витків в обмотці котушок $n=400$, товщина повітряного проміжку $d=0,2$ мм.

5. Вимірюючі прилади ввімкнені в коло змінного струму за схемою, зображеною на рисунку. Визначити величини опорів R_1 і X_L і побудувати векторну діаграму процесу. Визначити величину напруги на ділянці KM та зсув фаз φ , якщо покази ватметра 940 Вт, вольтметра 220 В, амперметра 5 А, а $R_2=22$ Ом.

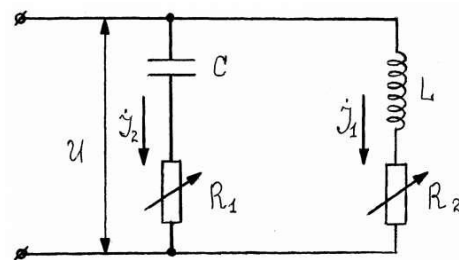


6. Трифазний споживач енергії, який має активний опір на кожній фазі становить $R=8$ Ом і індуктивний опір $X_L=6$ Ом ввімкнено в мережу трифазного струму з лінійними напругами 380 В. Визначити напругу на кожній фазі і підвідних провідниках, якщо фази сполучені а) зіркою, б) трикутником.

Практичне заняття № 20.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ.

1. У контурі $R_1=R_2=R$, які під'єднані послідовно до конденсатора $C=50$ мкФ і котушки індуктивності $L=1,25$ мГн. Опори змінюються одночасно і однаково. При якому значенні R настане резонанс струму при частоті $\nu=1000$ Гц. Визначити струм у витках і нерозгалуженій частині кола, якщо напруга змінного струму 12 В.



2. Яку індуктивність повинна мати котушка, щоб в контурі з конденсатором ємністю 50 пФ виникли вільні коливання з частотою 10 МГц?

3. В коливальному контурі, що складається з активного опору $R=4$ кОм, котушки індуктивності $L=0,01$ Гн і конденсатора. Заряд конденсатора зменшується в 10 разів за період $T=10^{-5}$ с. Визначити активний опір котушки індуктивності.

4. Визначити хвильовий опір коаксіального кабелю, довжиною l , якщо по внутрішньому циліндричному провіднику тече струм I , магнітна проникність ізоляції μ , а ємність системи C . Радіуси внутрішнього і зовнішнього провідників R_1 і R_2 .

5. Випромінювання антени міської радіостанції має потужність $N=100$ кВт. Обчислити на відстанях $R_1=1$ км і $R_2=100$ км величину вектора Умова-Пойнтінга Π , напруженість електричного поля E , напругу U , яка виникає в приймальній антені радіоприймача завдовжки $l=1$ м, тиск електромагнітних хвиль p .

3.2.1.3. Задачі для самостійного розв'язування з електромагнетизму Постійне магнітне поле у вакуумі

Індукція магнітного поля, яке утворюється елементом струму Idl (закон Біо-Савара-Лапласа)

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[dl\mathbf{r}]}{r^3} \quad (6.1)$$

де μ_0 - магнітна стала; μ - відносна магнітна проникність середовища; dl - вектор елемента довжини провідника, проведений у напрямі струму; \mathbf{r} - радіус-вектор, проведений з середини елемента струму в точку, в якій визначається $d\mathbf{B}$.

Зв'язок магнітної індукції \mathbf{B} і напруженості \mathbf{H} магнітного поля:

$$\mathbf{B} = \mu_0\mu\mathbf{H} \quad (6.2)$$

Принцип суперпозиції (накладання) магнітних полів

$$\mathbf{B} = \int d\mathbf{B} \quad (6.3)$$

Магнітні поля найпростіших систем:

а) точкового заряду q , що рухається з нерелятивістською швидкістю v .

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \frac{q[\mathbf{v}\mathbf{r}]}{r^3} \quad (6.4)$$

де \mathbf{r} - радіус-вектор, проведений від заряду в дану точку поля;

б) прямолінійного відрізка провідника зі струмом (за модулем)

$$B = \frac{\mu_0\mu}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (6.5)$$

де r_0 - відстань від провідника до точки; φ_1, φ_2 - кути між напрямом струму й напрямом від кінців провідника до точки, в якій визначається індукція магнітного поля;

в) нескінченно довгого прямого провідника зі струмом (за модулем)

$$B = \frac{\mu_0\mu I}{2\pi r_0} \quad (6.6)$$

г) на осі колового струму

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \frac{2\mathbf{p}_m}{(R^2+r^2)^{3/2}} \quad (6.7)$$

де \mathbf{p}_m - магнітний момент колового струму, $\mathbf{p}_m=IS\mathbf{n}$; тут S - площа, яка охоплюється струмом; \mathbf{n} - одиничний вектор додатної нормалі, напрям

якого визначають за правилом гвинта; R - радіус колового струму; r - відстань від центра колового струму до даної точки;

д) соленоїда в довільній точці, що лежить на його осі (за модулем),

$$B = \frac{\mu_0 \mu n I}{2} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (6.8)$$

де n - кількість витків на одиницю довжини соленоїда; α_1, α_2 - кути між напрямом поля в соленоїді й відрізками прямих, проведених з даної точки до кінців соленоїда;

е) усередині достатньо довгого соленоїда в точці, віддаленій від його кінців

$$B = \mu_0 \mu n I \quad (6.9)$$

Сила, що діє з боку магнітного поля на внесений у нього елемент електричного струму (сила Ампера)

$$d\mathbf{F} = I[d\mathbf{l} \times \mathbf{B}] \quad (6.10)$$

Сила взаємодії двох прямих, нескінченно довгих паралельних провідників зі струмами I_1 і I_2 :

$$dF = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b} dl \quad (6.11)$$

де b - відстань між провідниками; dl - відрізок провідника,

У разі сумісної дії електричного \mathbf{E} і магнітного \mathbf{B} полів сила, яка діє на заряджену частинку із зарядом q , що рухається зі швидкістю \mathbf{v} (сила Лоренца),

$$\mathbf{F}_L = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (6.12)$$

Холлівська поперечна різниця потенціалів

$$\Delta\varphi = R_x \frac{IB}{b} \quad (6.13)$$

де b - товщина пластинки; R_x - постійна Холла, $R_x = 1/(en)$; тут n - концентрація електронів.

Циркуляція вектора \mathbf{B} (закон повного струму для магнітного поля у вакуумі)

$$\oint_L B_l dl = \mu_0 \sum I_k \quad (6.14)$$

де L - контур довільної форми; B_l - проекція вектора індукції на дотичну до контуру L у напрямі обходу; dl - елемент довжини контуру; $\sum I_k$ - алгебрична сума сил струмів, що охоплюються контуром.

Потік вектора \mathbf{B} крізь довільну поверхню S

$$\Phi_B = \int_S B_n dS \quad (6.15)$$

де B_n - проекція вектора \mathbf{B} на напрям нормалі до площини; dS - елементарна площа.

Теорема Гаусса для вектора \mathbf{B}

$$\oint_S B_n dS = 0 \quad (6.16)$$

Момент сил, що діють на контур зі струмом у магнітному полі

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \times \mathbf{B}] \quad (6.17)$$

Елементарна робота з переміщення провідника зі струмом у магнітному полі

$$dA = Id\Phi \quad (6.18)$$

де $d\Phi$ - магнітний потік, який перетинається провідником.

Робота з переміщення замкнутого контуру зі струмом у магнітному полі

$$A = I\Delta\Phi \quad (6.19)$$

де $\Delta\Phi$ - зміна магнітного потоку крізь поверхню, обмежену контуром.

Магнітне поле прямого, колового та соленоїдного струмів

259. Двома нескінченно довгими проводами, відстань між якими $d=10$ см, в одному напрямі проходять струми, сила кожного $I=20$ А. Визначити індукцію магнітного поля B в точці, що міститься на відстані $r_1=8$ см від одного і $r_2=6$ см від іншого проводів.

260. Два довгих прямих провідники зі струмами, сила кожного $I=10$ А, розміщені взаємно перпендикулярно. Обчислити індукцію магнітного поля B в точці, що лежить на середині перпендикуляра до осей цих провідників, якщо довжина перпендикуляра $d=10$ см.

261. Струм, сила якого $I=16$ А, проходить по нескінченно довгому проводу, зігнутому під прямим кутом (рис. 3.48). Визначити індукцію магнітного поля B в точках, що містяться на відстані $r=10$ см від вершини: а) на продовженні однієї зі сторін кута; б) на бісектрисі кута.

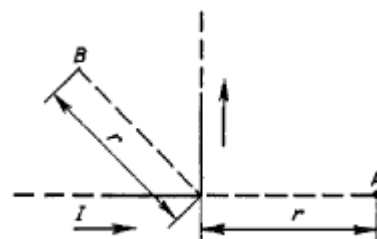


Рис. 3.48

262. По проводу, який зігнуто у вигляді квадрата зі стороною $a=60$ см, проходить постійний струм. Сила струму $I=3$ А. Визначити індукцію магнітного поля B у центрі квадрата.

263. При якій силі струму I , що проходить по тонкому провідному кільцю радіуса $R=0,2$ м, індукція магнітного поля B в точці, рівновіддаленій від усіх точок кільця на відстань $r=0,3$ м, дорівнюватиме 20 мкТл?

264. Тангенс-гальванометром називається вертикально розташована плоска котушка великого діаметра. У центрі котушки розміщено невелику магнітну стрілку, яка може обертатися навколо вертикальної осі (компас). Площину котушки встановили у площині магнітного меридіана Землі. Обчислити горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі B_r , якщо сила струму в котушці $I=0,5$ А, кількість витків $N=5$, радіус котушки $R=30$ см, кут відхилення стрілки $\alpha=15^\circ$.

265. По тонкому дріт'яному кільцю проходить струм. Не змінюючи сили струму в провіднику, йому надали форму квадрата. У скільки разів зміниться індукція магнітного поля в центрі контуру?

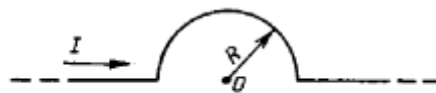


Рис. 3.49

266. Нескінченно довгий тонкий провідник зі

струмом, сила якого $I=20$ А, має згин (плоску петлю) радіуса $R=5$ см. Визначити в точці O індукцію магнітного поля B , створеного цим струмом (рис. 3.49).

267. По плоскому контуру з тонкого провідника проходить струм, сила якого $I=20$ А (рис. 3.50). Визначити індукцію магнітного поля B в точці O . Радіус кола $R=5$ см.

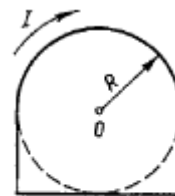


Рис. 3.50

268. Визначити напруженість магнітного поля H точці O контурів зі струмом I , які показано на рис. 3.51, а, б.

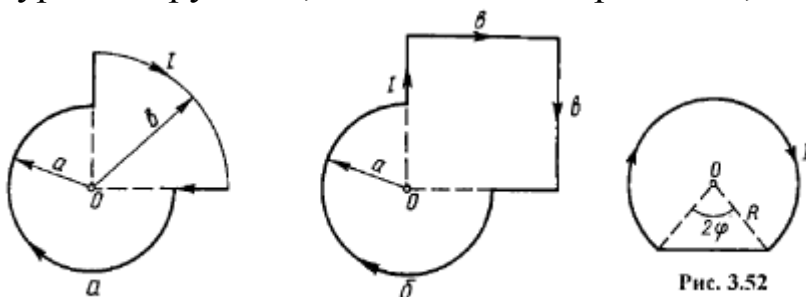


Рис. 3.51

Рис. 3.52

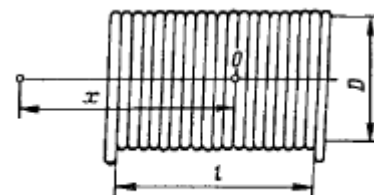


Рис. 3.53

269. Струм, сила якого $I=12$ А, проходить по замкнутому провіднику (рис. 3.52). Радіус зігнутої частини провідника $R=0,12$ м, кут $2\varphi=90^\circ$. Визначити індукцію магнітного поля B в точці O .

270. У соленоїді завдовжки $l=1$ м, що містить $N=1\,000$ витків, рівномірно намотаних, проходить струм, сила якого $I=1$ А (рис. 3.53). Діаметр соленоїда $D=2$ см. Визначити індукцію магнітного поля B в точках, що лежать від його середини на відстані $x=0; 25; 40; 45; 50; 60$ см.

Магнітне поле заряду, що рухається

271. Електрон, що рухається прямолінійно, створює в точці, яка міститься від нього на відстані $r=10$ нм, магнітне поле. Максимальне значення напруженості магнітного поля $H_{\max}=640$ А/м. Визначити швидкість v електрона.

272. Точковий заряд рухається зі швидкістю $v=900$ м/с. У деякий момент часу в точці спостереження A напруженість електричного поля цього заряду $E=600$ В/м, а кут між векторами E і v $\alpha=30^\circ$. Обчислити індукцію магнітного поля B даного заряду в точці A в цей момент часу.

273. Згідно з теорією Бора електрон в атомі водню рухається навколо ядра по коловій орбіті радіуса $r=53$ пм. Визначити індукцію магнітного поля B , яку створює електрон у центрі колової орбіти.

Сила Ампера

274. По мідному стрижню, що лежить поперек двох горизонтальних рейок, розміщених на відстані $d=0,3$ м одна від одної, проходить струм силою $I=50$ А. Маса стрижня $m=0,14$ кг. Магнітне поле, яке перпендикулярне до площини рейок, спричиняє рівномірний рух стрижня.

Визначити індукцію магнітного поля B , якщо коефіцієнт тертя ковзання стрижня об рейки $f=0,6$.

275. По двох паралельних провідниках, довжина кожного $l=3$ м, проходять струми однакової сили. Відстань між провідниками $d=1$ см. Струми взаємодіють між собою із силою $F=0,5$ мН. Визначити силу струму I в провідниках.

276. По довгій горизонтальній шині проходить струм, сила якого $I=500$ А. На якій відстані d від шини паралельно їй у тій самій вертикальній площині має бути розміщений довгий мідний провід, по якому проходить такої самої сили струм, щоб провід перебував у рівновазі? Чи буде ця рівновага стійкою? Площа перерізу проводу $S=25$ мм².

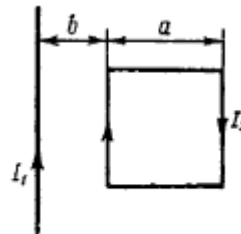


Рис. 3.54

277. У магнітне поле прямого струму, сила якого $I_1=20$ А, вміщено дротяну квадратну рамку. Сторона рамки $a=10$ см. По рамці проходить струм, сила якого $I_2=9$ А. Провідник зі струмом розміщується в площині рамки. Одна сторона рамки паралельна прямому струмові й міститься від нього на відстані $b=5$ см (рис. 3.54). Визначити результуючу силу що діє на рамку.

278. Провід у вигляді тонкого півкільця радіуса $R=10$ см міститься в однорідному магнітному полі, індукція якого $B=50$ мТл. По проводу проходить струм, сила якого $I=10$ А. Визначити силу що діє на провід, якщо лінії індукції: а) лежать у площині півкільця перпендикулярно до його діаметра; б) перпендикулярні до площини півкільця. Як зміниться сила, якщо провід випрямити?

279. По тонкому провіднику у вигляді кільця радіуса $r=20$ см проходить струм, сила якого $I=100$ А. Перпендикулярно до площини кільця збуджено однорідне магнітне поле, індукція якого $B=20$ мТл. Обчислити силу F , що розтягує кільце.

280. Два прямолінійних довгих паралельних провідники розміщені на відстані $r_1=10$ см один від одного. По провідниках в одному напрямі проходять струми, сили яких $I_1=20$ А і $I_2=30$ А. Яку роботу треба виконати (на одиницю довжини), щоб розсунути ці провідники на відстань $r_2=20$ см?

Магнітний момент. Контур зі струмом у магнітному полі

281. Визначити магнітний момент p_m колового витка зі струмом, якщо радіус витка $R=10$ см, індукція магнітного поля у його центрі $B=6$ мкТл.

282. Вважаючи, що електрон в атомі водню обертається по коловій орбіті радіуса $r=53$ пм, обчислити його орбітальний магнітний момент p_m . Визначити також відношення орбітального магнітного моменту p_m до моменту імпульсу L орбітального руху електрона.

283. Тонке кільце, маса якого $m=15$ г, радіус $r=12$ см, рівномірно заряджене з лінійною густиною $\tau=10$ нКл/м. Кільце рівномірно обертається

відносно осі, яка є перпендикулярною до площини кільця й проходить через її центр. Визначити відношення магнітного моменту p_m колового струму, що створюється кільцем, до його моменту імпульсу L .

284. Заряд $q=0,2$ мкКл рівномірно розподілений по поверхні диска радіуса $R=10$ см, який рівномірно обертається з частотою $\nu=20$ с⁻¹ відносно осі, перпендикулярної до площини диска. Вісь проходить через його центр. Визначити магнітний момент p_m колового струму, що створюється диском, та встановити відношення магнітного моменту до моменту імпульсу (p_m/L) якщо маса диска $m=100$ г.

285. На осі колового струму, сила якого $I_1=10$ А, радіус $R=10$ см, на відстані $h=2$ м від його центра розміщено невеликий виток, по якому проходить струм силою $I_2=2$ А. Вісь колового струму лежить у площині витка, площа якого $S=8$ см². Визначити механічний момент M , що діє на виток.

286. Прямокутна рамка, по якій проходить струм силою $i=2$ А, розміщена в однорідному магнітному полі так, що її площа перпендикулярна до лінії магнітної індукції. Індукція магнітного поля $B=1$ Тл. На рамку починає діяти сталий зовнішній обертальний момент $M=1$ Нм. Яку кутову швидкість ω матиме рамка, коли вона повернеться на кут $\varphi=180^\circ$, якщо її момент інерції $I=10^{-2}$ кг·м², а площа $S=10^3$ см²? Сила струму під час обертання рамки підтримується незмінною.

287. По витку радіуса $R=2$ см проходить струм, сила якого $I=0,5$ А. Виток підвішений у магнітному полі Землі, горизонтальна складова якого $B_r=20$ мкТл. Коли виток перебуватиме в стійкій рівновазі і чому при цьому дорівнюватиме індукція магнітного поля в його центрі?

288. Рамка дзеркального гальванометра, що має $N=500$ витків, площа її $S=2$ см², підвішена на тонкій нитці завдовжки $l=10$ см у проміжку між полюсами магніту, який створює магнітне поле, напрямлене радіально до осі обертання рамки. Індукція магнітного поля $B=0,20$ Тл. Яка ціна поділки шкали s , якщо вона розташована на відстані $L=1,0$ м від дзеркальця, а поділки нанесені через $d=1,0$ мм? Радіус нитки $r=50$ мкм, а модуль зсуву матеріалу нитки $G=45$ ГПа.

Сила Лоренца

289. Електрон, на який діє прискорювальна різниця потенціалів $U=3,5$ кВ, влітає в однорідне магнітне поле, індукція якого $B=0,01$ Тл, перпендикулярно до ліній магнітної індукції й рухається по колу радіуса $R=2$ см. Обчислити відношення заряду електрона до його маси.

290. Визначити релятивістські маси електрона та протона, що рухаються в магнітному полі, індукція якого $B=1$ Тл, по колу радіуса $R=10$ см.

291. З однієї точки в одному напрямі з однаковими швидкостями $v=10^6$ см/с вилітає потік іонів водню й дейтерію. Однорідне магнітне поле, індукція якого $B=2$ мТл, напрямлене перпендикулярно до швидкості. Визначити відстань Δx між точками, в яких іони, що описали півколо, зіткнулися з площиною, перпендикулярною до напрямку початкової швидкості.

292. Електрон, прискорений різницею потенціалів $U=3$ кВ, влітає в магнітне поле соленоїда під кутом $\alpha=30^\circ$ до його осі. Кількість витків соленоїда $N=2000$, його довжина $l=25$ см, сила струму $I=2,5$ А. Визначити крок h гвинтової траєкторії електрона в магнітному полі соленоїда.

293. Електрон рухається в однорідному магнітному полі, індукція якого $B=4$ мТл. Визначити період T обертання електрона.

294. Електрон рухається по колу радіуса $R=1$ см в однорідному магнітному полі, індукція якого $B=0,2$ Тл. Визначити магнітний момент p_m еквівалентного колового струму.

295. До пластин конденсатора, відстань між якими $d=1$ см, прикладено напругу $U=20$ В. Перпендикулярно до напрямку електричного поля в конденсаторі накладено однорідне магнітне поле. Визначити індукцію B магнітного поля, при якому протон, що влетів у конденсатор паралельно його пластинам зі швидкістю $v=2$ мм/с, рухатиметься прямолінійно.

296. Електрон влітає в суміжні за напрямом однорідні електричне та магнітне поля зі швидкістю $v=1$ мм/с. Напруженість електричного поля $E=100$ В/м, індукція магнітного поля $B=10^{-4}$ Тл. Обчислити прискорення a електрона, якщо напрям його швидкості: а) є перпендикулярним до векторів \mathbf{E} та \mathbf{B} ; б) збігається із загальним напрямом векторів \mathbf{E} і \mathbf{B} .

297. Індукція магнітного поля циклотрона $B=1$ Тл. Яка частота ν прискорювального поля між дуантами, якщо в циклотроні прискорюються протони?

298. У мас-спектрометрі Бейнбриджа (рис. 3.55) відстань між вихідною щілиною селектора швидкостей і вхідною щілиною реєструючого іони приладу $l=40$ см. Індукція магнітного поля $B'=B=5 \cdot 10^{-2}$ Тл. У разі повільної зміни напруженості електричного поля селектора спостерігаються піки іонного струму в приймачі при значеннях $E_1=120$ В/см і $E_2=160$ В/см. Визначити атомні маси A_1 і A_2 відповідних іонів, вважаючи їх однозарядними. Ідентифікувати ці іони, тобто вказати, якому хімічному елементу вони відповідають.

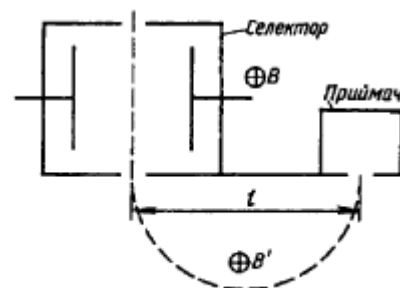


Рис. 3.55

299. У конденсаторі, електродами якого є частини коаксіальних циліндричних поверхонь радіусами $r_1=6$ см і $r_2=5$ см, уздовж осі циліндрів діє однорідне магнітне поле, індукція якого $B=0,2$ Тл. Крізь вузьку щілину в діафрагмі АА (рис. 3.56) у конденсатор влітає α -частинка, енергія якої

$\varepsilon=10^3$ еВ. Яку різницю потенціалів U потрібно прикласти між електродами конденсатора, щоб α -частинка рухалась у конденсаторі на однаковій відстані від електродів? Зовнішній електрод має від'ємний потенціал.

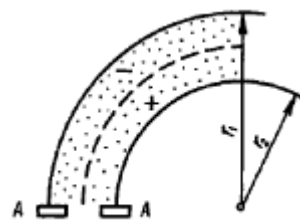


Рис. 3.56

300. Діаметр дуантів циклотрона, призначеного для прискорення протонів, $d=1$ м, індукція магнітного поля, під дією якого протони рухаються по колу, $B=11,2$ Тл. Амплітуда напруги між дуантами $U=100$ кВ. Визначити максимальну енергію W , яку можуть одержати протони, та швидкість v при виході їх із циклотрона, а також час t , протягом якого відбувалось прискорення. Показати, що для нерелятивістської частинки період її обертання по колу не залежить від прискорювальної напруги.

301. Для одержання частинок великих енергій їх розганяють в електричних полях до швидкостей, близьких до швидкості світла у вакуумі. У резонансних прискорювачах рух частинок по кругових орбітах відбувається внаслідок дії однорідного магнітного поля. Виходячи з умови, що доцентровою силою є сила Лоренца, встановити зв'язок між повною релятивістською енергією частинки ε , індукцією магнітного поля B , циклічною частотою обертання частинки на орбіті ω та її зарядом q .

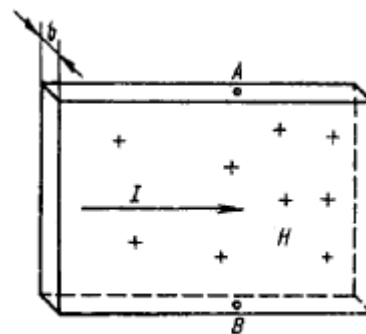


Рис. 3.57

302. У металевій стрічці завтовшки $b=0,1$ мм проходить струм, сила якого $I=10$ А. Стрічка розміщена в магнітному полі, напруженість якого $H=8 \cdot 10^4$ А/м. Лінії напруженості є перпендикулярними до стрічки. Визначити різницю потенціалів U_{AB} між точками A і B (рис. 3.57). Концентрація електронів провідності $n=9 \cdot 10^{27}$ м $^{-3}$.

303. Показати, що під час проходження струму в провіднику, який міститься в однорідному магнітному полі з індукцією \mathbf{B} , нормальною до напрямку струму, відношення напруженості поля Холла до напруженості поля, яке створює струм у провіднику, $E_x/E=B/(ner)$, де n - концентрація електронів провідності, r - питомий опір провідника.

304. Визначити, у скільки разів постійна Холла в міді є більшою, ніж у алюмінію, коли відомо, що в алюмінії на один атом у середньому припадає два електрони, а в міді - 0,8 вільного електрона. Густина міді та алюмінію відповідно 8,93 та 2,7 г/см 3 .

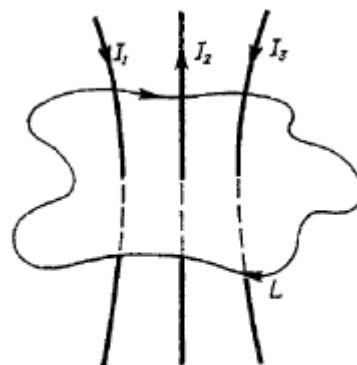


Рис. 3.58

Циркуляція вектора магнітної індукції \mathbf{B}

305. Визначити циркуляцію вектора магнітної індукції \mathbf{B} вздовж контуру L (рис. 3.58). Напря-

обходу вказаний на рисунку, сили струмів $I_1=I_2=1$ А, $I_3=2$ А.

306. Визначити циркуляцію вектора магнітної індукції \mathbf{B} для замкнених контурів 1, 2 і 3 (рис.3.59), якщо сили струмів $I_1=1$ А та $I_2=2$ А.

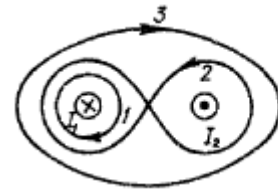


Рис. 3.59

307. Визначити, застосувавши теорему про циркуляцію вектора магнітної індукції \mathbf{B} , індукцію магнітного поля на осі тороїду без осердя. По обмотці тороїду з $N=2000$ витків проходить струм, сила якого $I=5$ А. Діаметр тороїду по середній лінії $D=50$ см.

308. Обчислити індукцію магнітного поля B довгого прямого проводу радіуса $R=3$ мм у точках, які лежать на відстанях $r_1=2$ мм і $r_2=5$ мм від його осі. Сила струму в проводі $I=6$ А.

309. Струм силою I проходить по порожнистому провідному циліндру вздовж його осі (рис. 3.60). Внутрішній радіус циліндра R_1 зовнішній – R_2 . Густина струму по перерізу провідника є однаковою. Визначити індукцію магнітного поля B на відстанях від осі: а) $r < R_1$; б) $R_1 < r < R_2$; в) $r > R_2$.

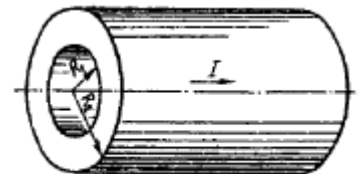


Рис. 3.60

310. Кабель зроблений з проводу та охоплюючого його коаксіального провідного циліндра, по якому проходить струм у напрямі, протилежному до напрямку струму в проводі (рис. 3.61). Сила струму $I=10$ А, густини струмів є однаковими по перерізу. Радіус центрального проводу $a=5$ мм, внутрішній і зовнішній радіуси циліндра відповідно $b=10$ мм і $c=14$ мм. Простір між проводом і циліндром заповнено діелектриком. Визначити магнітну індукцію на різних відстанях r від осі: а) у середині центрального проводу, $r_1=3$ мм; б) у просторі між провідниками, $r_2=7$ мм; в) у середині циліндра, $r_3=13$ мм; г) поза кабелем, $r_4=20$ мм.

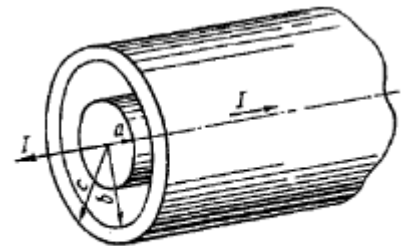


Рис. 3.61

311. Уздовж осі довгого провідного циліндра радіуса R_1 проходить постійний струм силою I . У середині міститься циліндрична порожнина радіуса R_2 вісь якої зміщена відносно осі циліндра на відстань r_0 (рис. 3.62). Визначити індукцію магнітного поля як функцію відстані осі циліндра в будь-якій точці радіальної прямої, що проходить через вісь циліндричної порожнини.

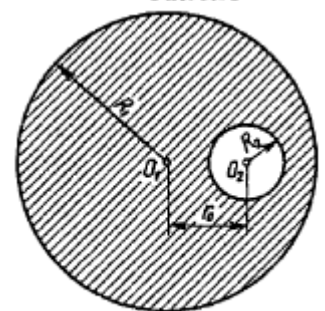


Рис. 3.62

312. Застосувавши теорему про циркуляцію вектора магнітної індукції, довести, що магнітне поле нескінченного довгого соленоїда: а) однорідне; б) дорівнює нулеві зовні соленоїда.

Потік вектора магнітної індукції. Робота з переміщення провідника зі струмом у магнітному полі

313. В однорідному магнітному полі, індукція якого $B=0,05$ Тл, розміщується плоский контур. Площа контуру $S=20$ см². Визначити магнітний потік Φ , що пронизує контур, якщо площина його утворює кут $\varphi=30^\circ$ з лініями індукції.

314. У середній частині соленоїда, який містить $n=10$ витків на кожний сантиметр довжини, вміщено круговий виток діаметра $d=1$ см. Площина витка розміщена під кутом $\alpha=30^\circ$ до осі соленоїда. Визначити магнітний потік Φ , що пронизує виток, якщо по обмотці соленоїда проходить струм, сила якого $I=10$ А.

315. В одній площині з нескінченно довгим проводом, по якому проходить струм силою $I=5$ А, розміщено прямокутну рамку ($l_1=20$ см, $l_2=10$ см). Довші сторони рамки є паралельними прямому струмові, ближча до проводу сторона рамки розміщена на відстані $a=5$ см від нього. Визначити потік вектора \mathbf{B} крізь площину рамки.

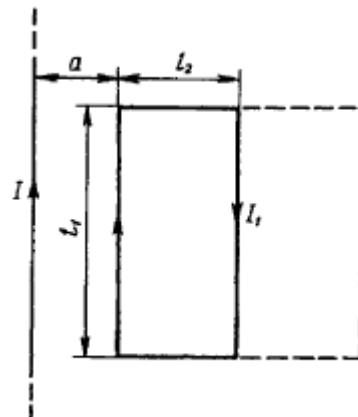


Рис. 3.63

316. Струм, сила якого $I=10$ А, проходить по довгому прямому провіднику круглого перерізу. Обчислити магнітний потік Φ , який пронизує одну з половин осьового перерізу провідника на довжині $l=2$ м.

317. Соленоїд, довжина якого $l=3$ м і площа поперечного перерізу $S=20$ см², містить $N=3500$ витків. Визначити повний магнітний потік, зчеплений з усіма витками соленоїда ψ , якщо сила струму в обмотці $I=10$ А.

318. В однорідне магнітне поле, індукція якого $B=0,05$ Тл, вміщено прямий провідник завдовжки $l=10$ см, розміщений перпендикулярно до ліній магнітної індукції. По провіднику проходить струм, сила якого $I=2$ А. Під дією сил поля провідник перемістився на відстань $x=4$ см. Обчислити роботу A сил поля.

319. Квадратний контур зі стороною $a=10$ см, по якому проходить струм, міститься в магнітному полі ($B=0,8$ Тл) під кутом $\alpha=50^\circ$ до ліній магнітної індукції. Сила струму $I=6$ А. Яку роботу A треба виконати, щоб не змінюючи силу струму в контурі, змінити його форму на колову?

320. В однорідному магнітному полі, індукція якого $B=1$ Тл, розміщується плоска котушка з $N=100$ витків радіуса $r=10$ см, площина якої утворює кут $\beta=60^\circ$ з напрямком поля. По котушці проходить струм, сила якого $I=10$ А. Визначити роботу A , яку потрібно виконати для видалення цієї котушки з магнітного поля.

321. Плоский контур зі струмом, сила якого $I=50$ А, розміщено в однорідному магнітному полі ($B=0,6$ Тл) так, що нормаль до контуру є перпендикулярною до ліній магнітної індукції. Визначити роботу A , яка

виконується силами поля у разі повільного повертання контуру навколо осі, розміщеної в площині контуру, на кут $\alpha=30^\circ$. Площа контуру $S=200 \text{ см}^2$. При повороті контуру сила струму підтримується незмінною.

322. В одній площині з нескінченно довгим проводом, по якому проходить струм силою $I=5 \text{ А}$, розміщено прямокутну рамку ($l_1 - 20 \text{ см}$, $l_2 = 10 \text{ см}$). По рамці проходить струм, сила якого $I_1=0,2 \text{ А}$. Довші сторони рамки є паралельними прямому струмові, ближча до проводу сторона рамки міститься від нього на відстані $a=5 \text{ см}$, струм у ній того самого напрямку, що й у проводі (рис. 3.63). Визначити роботу $A_{\text{зовн}}$, яку треба виконати, щоб повернути рамку на кут $\alpha=\pi$ навколо дальшої довгої сторони рамки.

Електромагнітна індукція

ЕРС електромагнітної індукції (закон Фарадея)

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (7.1)$$

Якщо контур, в якому індукується ЕРС, містить N витків, то

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (7.1a)$$

де Ψ - потокозчеплення, $\Psi=N\Phi$.

Різниця потенціалів U , яка виникає на кінцях провідника завдовжки l , що рухається зі швидкістю v в однорідному магнітному полі з індукцією B

$$U = Blv \sin \alpha \quad (7.2)$$

де α - кут між векторами v і B .

ЕРС індукції, що виникає в рамці, яка містить N витків й обертається з кутовою швидкістю ω в однорідному магнітному полі

$$\varepsilon = BNS\omega \sin \omega t \quad (7.3)$$

Кількість електрики, що проходить у контурі під час зміни потокозчеплення

$$Q = \frac{\Delta\Psi}{R} \quad (7.4)$$

Потокозчеплення контуру

$$\Psi = LI \quad (7.5)$$

де L - індуктивність контуру.

Індуктивність довгого соленоїда та тонкого тороїду

$$L = \mu_0 \mu n^2 V \quad (7.6)$$

де n - кількість витків на одиницю довжини соленоїда (тороїду); V - об'єм соленоїда (тороїду).

ЕРС самоіндукції

$$\varepsilon_{ci} = -L \frac{dI}{dt} \quad (7.7)$$

Взаємна індуктивність контурів

$$\Phi_{12} = -L_{12}I_2 \quad (7.8)$$

ЕРС взаємної індукції

$$\varepsilon_{12} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (7.9)$$

Миттєві значення сили струму, що виникають під час замикання та розмикання електричного кола з постійною ЕРС ε_0 , у колі, яке має:

а) індуктивність L та опір R

$$I(t) = \frac{\varepsilon_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right); I(t) = \frac{\varepsilon_0}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (7.10)$$

б) ємність C та опір R

$$I(t) = \frac{\varepsilon_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7.11)$$

Енергія магнітного поля струму

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (7.12)$$

Взаємна енергія двох струмів

$$W_{12} = L_{12} I_1 I_2 \quad (7.13)$$

Об'ємна густина енергії магнітного поля

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2} \quad (7.14)$$

Електромагнітна індукція

323. Встановити напрям індукційного струму в металевому кільці, якщо вздовж його осі вводиться постійний магніт, спрямований південним полюсом у центр кільця. Те саме, якщо магніт виводиться.

324. Прямий дрід, довжина якого $l=40$ см, рухається в однорідному магнітному полі зі швидкістю $v=5$ м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Різниця потенціалів між кінцями дроту $U=0,6$ В. Обчислити індукцію магнітного поля B .

325. Провідник AB (рис. 3.64) завдовжки $l=30$ см міститься в однорідному магнітному полі з індукцією $B=0,1$ Тл. На кінцях провідника підтримується постійна різниця потенціалів $U_0=4$ мВ. Напрями поля й провідника є взаємно перпендикулярними. Якої найбільшої швидкості v_{\max} може досягти провідник, якщо йому надати можливість вільно рухатися? Магнітна проникність середовища дорівнює одиниці.

326. Горизонтальний стрижень завдовжки $l=1$ м обертається навколо вертикальної осі, що проходить через один із його кінців. Вісь обертання є паралельною векторові індукції магнітного поля ($B=50$ мкТл). Якою має бути частота обертання n , щоб різниця потенціалів U на кінцях цього стрижня дорівнювала 1 мВ?

327. Металевий диск радіуса $R=15$ см, площа якого перпендикулярна до вектора індукції магнітного поля, обертається з частотою $n=10$ с⁻¹ (вісь

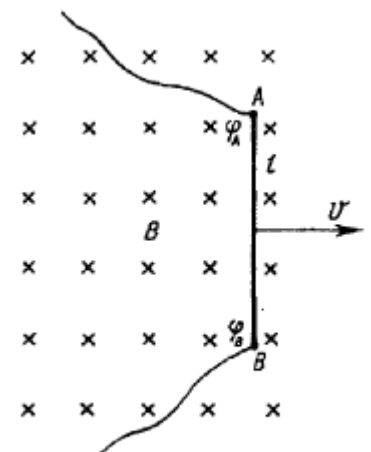


Рис. 3.64

обертання диска паралельна лініям магнітної індукції й проходить через його центр). Індукція магнітного поля $B=3$ мТл, Визначити різницю потенціалів $\Delta\phi$ між центром і краєм диска: а) якщо поля немає; б) за наявності поля.

328. В однорідному магнітному полі, індукція якого $B=0,84$ Тл, з невеликою швидкістю обертається квадратна рамка, що містить невелику кількість витків мідного дроту. Площа поперечного перерізу дроту $S=0,5$ мм², сторона рамки $a=5$ см. Кінці рамки короткозамкнені. Максимальна сила струму, індукованого в рамці під час обертання, $I_{\max}=1,9$ А. Визначити частоту n обертання рамки.

329. Рамка, площа якої $S=200$ см², рівномірно обертається з частотою $n=10$ с⁻¹ в однорідному магнітному полі. Індукція поля $B=0,2$ Тл. Вісь обертання лежить у площині рамки й перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Чому дорівнює середнє значення ЕРС індукції за час, протягом якого магнітний потік збільшиться від нуля до максимального значення?

330. У магнітному полі Землі (горизонтальна складова індукції $B_r=20$ мкТл) вертикально розміщені паралельні проводи, до яких підімкнуто конденсатор ємністю $C=10$ мкФ (рис.3.65). По проводах, відстань між якими $l=1$ м, може ковзати без тертя металевий брусок, опускаючись під дією сили тяжіння. Маса бруска $m=1$ кг. Визначити прискорення бруска a та силу струму I в проводах. Площина рамки є перпендикулярною до магнітного меридіана Землі.

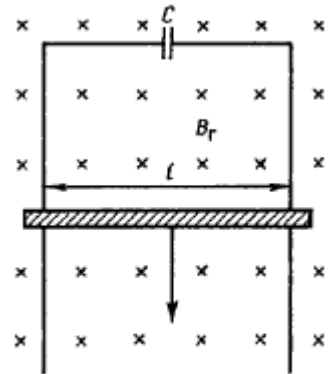


Рис. 3.65

331. Квадратна рамка з тонкого проводу, опір якої $R=0,02$ Ом, розміщена біля прямого проводу зі струмом. Провід лежить у площині рамки й паралельний двом її сторонам, відстані до яких відповідно $l_1=10$ см, $l_2=20$ см. Визначити силу струму I в проводі, якщо при його вмиканні крізь рамку пройшла кількість електрики $q=639$ нКл.

332. Квадратна дрітjana рамка, сторона якої $a=10$ см, та довгий прямий провід зі струмом, сила якого $I=10$ А, розміщені в одній площині (див. рис. 3.54). Рамку поступально переміщують праворуч зі швидкістю $v=0,5$ м/с. Обчислити ЕРС індукції ε_i в рамці через $t=3$ с після початку руху, якщо в початковий момент часу рамка перебувала від проводу на відстані $b=2$ см.

333. Тонкий мідний провід, маса якого $m=5$ г, зігнутий у вигляді квадрата й кінці його замкнені. Квадрат розміщено в однорідному магнітному полі ($B=0,2$ Тл) так, що його площина є перпендикулярною до ліній магнітної індукції. Визначити заряд q , який пройде по проводу, якщо квадрат потягнути за протилежні вершини й витягнути в лінію.

334. Замкнене коло складається з послідовно ввімкнутих джерела постійної ЕРС ε з внутрішнім опором r і стрижня OA (рис. 3.66). Стрижень, що має довжину l і опір R , обертається з кутовою швидкістю ω і ковзає по провідному півкільцю, опором якого можна нехтувати. Півкільце міститься в однорідному магнітному полі індукції B , перпендикулярному до площини півкільця. Визначити різницю потенціалів U на кінцях стрижня, потужність P_Q теплових втрат та механічну потужність P .

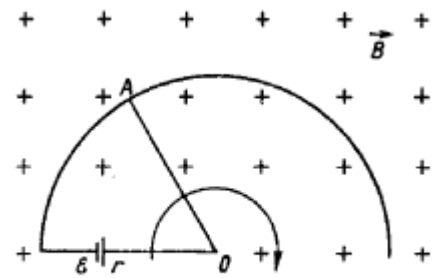


Рис. 3.66

335. У вертикальному магнітному полі з великої висоти падає кільце діаметра d , зроблене з тонкого дроту, питомий опір і густина матеріалу якого відповідно ρ і D . Площина кільця весь час є горизонтальною. Визначити швидкість v падіння кільця, яка встановилась, якщо індукція поля змінюється з висотою за законом $B=B_0(1 + ah)$.

336. Усередині соленоїда, який має $N_1=400$ витків проводу, рівномірно розподілених по його довжині $l=40$ см, міститься коротка котушка радіуса $r=2$ см, що має $N_2=500$ витків проводу з опором $R=10$ Ом. Визначити максимально можливий заряд q , що індукується в котушці під час її повороту на кут $\alpha=180^\circ$, якщо в соленоїді проходить струм, сила якого $I=10$ А.

337. До балістичного гальванометра з внутрішнім опором $r=31$ Ом приєднано кільце радіуса $R=1$ м, виготовлене з алюмінієвого дроту, площа поперечного перерізу якого $S=1$ мм². На яку відстань l відхилиться "зайчик" на шкалі, якщо кільце, що лежить на горизонтальній поверхні стола, перевернути з одного боку на інший? Вертикальна складова індукції магнітного поля Землі $B_v=50$ мкТл. "Зайчик" відхиляється на 1 мм під час проходження через рамку гальванометра заряду 10^{-8} Кл (балістична стала гальванометра $c_0=10^{-8}$ Кл/мм).

338. У магнітному полі, індукція якого змінюється за законом $B=\alpha + \beta t^2$, де $\alpha=10^{-1}$ Тл, $\beta=10^{-2}$ Тл/с², розміщена рамка зі стороною $a=20$ см. Площина рамки є перпендикулярною до ліній магнітної індукції. Визначити кількість теплоти Q , яка виділяється в рамці за перші $t=5$ с, якщо опір рамки $R=0,5$ Ом.

339. Магнітний потік крізь нерухомий контур опору R змінюється за час t за законом $\Phi=at(\tau - t)$. Встановити кількість теплоти Q , яка виділяється в контурі за цей час. Індуктивністю контуру нехтувати.

340. Усередині соленоїда, який має $N=300$ витків проводу, довжину $l=50$ см і перебуває у вакуумі, міститься металеве кільце. Площа кільця $S=5$ см², його опір $R=0,02$ Ом. Площина кільця є перпендикулярною до осі соленоїда. Сила струму в соленоїді збільшується за законом $I=kt$, де $k=1$ А/с. Як будуть напрямлені сили, що діють на кільце? Чому дорівнюватиме

сила F , яка діє на одиницю довжини кільця, через час $t=5$ с після ввімкнення струму?

Самоіндукція та взаємоіндукція

341. У котушці, що має $N=1000$ витків проводу, сила струму за допомогою реостата рівномірно збільшується зі швидкістю $dl/dt=0,1$ А/с, Діаметр перерізу котушки $d=10$ см, довжина її $l=50$ см. На котушку надіто кільце такого самого діаметра з мідного проводу, площа поперечного перерізу якого $S=2$ мм². Вважаючи, що магнітні потоки, які пронизують котушку й кільце, у будь-який момент дорівнюють один одному, обчислити силу струму I в кільці.

342. Індуктивність соленоїда, намотаного в один шар на немагнітний каркас, $L=0,5$ мГн. Довжина соленоїда $l=0,6$ м, діаметр $D=2$ см. Визначити відношення n кількості витків соленоїда до його довжини.

343. На круглому дерев'яному циліндрі розміщується обмотка з мідного дроту, маса якого $m=50$ г. Відстань $l=60$ см між крайніми витками є значно більшою від діаметра циліндра. Опір обмотки $R=300$ Ом. Яка індуктивність L обмотки?

344. Скільки метрів тонкого проводу треба взяти для виготовлення соленоїда завдовжки $l_0=100$ см індуктивністю $L=1$ мГн, якщо діаметр перерізу соленоїда значно менший, ніж його довжина?

345. По двох довгих паралельних проводах проходить однаковий струм у протилежних напрямках. Визначити індуктивність L двопровідної лінії на ділянці $l=1$ км. Радіус проводу $R=1$ мм, відстань між осевими лініями $d=0,4$ м.

Вказівка. Врахувати тільки внутрішній магнітний потік, тобто потік, що пронизує контур, обмежений проводами.

346. Визначити індуктивність L/l одиниці довжини кабелю, що являє собою два тонкостінних коаксіальних металевих циліндри (рис. 3.67), якщо радіус зовнішнього циліндра у $\eta=3,6$ рази більший, ніж радіус внутрішнього. Магнітну проникність середовища між циліндрами вважати такою, що дорівнює одиниці.

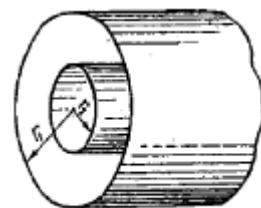


Рис. 3.67

347. На загальний каркас намотано дві котушки. Визначити взаємну Індуктивність котушок L_{12} , якщо постійний струм у першій котушці, сила якого $I_1=5$ А, утворює в другій магнітне потокозчеплення $\psi=40$ мВб.

348. Два соленоїди (індуктивність першого $L_1=0,36$ Гн, другого $L_2=0,64$ Гн) однакової довжини та практично з однаковими площами поперечного перерізу вставлені один в одний. Визначити взаємну індуктивність L_{12} соленоїдів.

349. Обчислити взаємну індуктивність L_{12} довгого прямого проводу й прямокутної рамки зі сторонами $a=10$ см і $b=15$ см. Рамка та прямий провід лежать в одній площині. Ближча до проводу сторона рамки, довжина якої b , паралельна проводу й віддалена від нього на відстань $l=8$ см.

Струми під час замикання і розмикання кола

350. Діаметр каркаса соленоїда $d=0,1$ м. Соленоїд має $N=500$ витків. Після підімкнення його до акумулятора з ЕРС $\mathcal{E}=12$ В через час $t=10^{-3}$ с сила струму в колі досягла значення $I=2$ А. Визначити довжину l соленоїда, якщо його опір $R=3$ Ом, Опором акумулятора й підвідних провідників нехтувати.

351. В обмотці соленоїда, опір якого $R=1$ Ом, а індуктивність $L=20$ мГн, проходить струм. Сила струму $I=5$ А. Чому дорівнює енергія W магнітного поля соленоїда через час $t=1$ с після від'єднання джерела напруги та короткого замикання кінців обмотки?

352. Обмотка соленоїда містить один шар витків мідного дроту, що прилягають один до одного. Діаметр дроту $d=0,2$ мм, діаметр соленоїда $D=5$ см. У соленоїді проходить струм, сила якого $I_0=1$ А. Визначити, яка кількість електрики q пройде крізь обмотку, якщо кінці її з'єднати між собою. Товщиною ізоляції нехтувати.

353. Обмотка соленоїда містить один шар витків мідного дроту діаметра $d=0,2$ мм, які щільно прилягають один до одного. Діаметр соленоїда $D=5$ см, кількість витків $N=400$. По соленоїду проходить струм, сила якого $I_0=1$ А. Визначити кількість теплоти Q , що виділяється в обмотці за час $t=0,1$ мкс після того, як її кінці замкнено коротко.

354. Визначити, за який час t сила струму замикання I досягне $\eta=0,98$ граничного значення, якщо джерело струму замикають на котушку, опір якої $R=10$ Ом, а індуктивність $L=0,4$ Гн.

355. Обчислити ємність C конденсатора, коли відомо, що до початку його розрядження через деякий опір напруга на ньому була $U_0=100$ В, сила струму I_0 в початковий момент часу $t_0=0$ становила 10 А, а через час $t=10$ мкс сила струму $I=4$ А.

356. До конденсатора, зарядженого до напруги $U_0=200$ В, ємність якого $C_1=1$ мкФ, підключений заряджений конденсатор ємністю $C_2=2$ мкФ. Встановити залежність сили струму в колі від часу, якщо опір провідників, що з'єднують обкладки конденсаторів, $R=1$ кОм. Яка кількість теплоти Q виділяється в провідниках під час проходження струму?

357. Плоский конденсатор с круглими пластинами діаметра $D=50$ см відстанню між ними $d=2$ мм заповнений діелектриком, діелектрична проникність якого $\epsilon=5,5$. Конденсатор підключений до джерела постійної напруги $U_0=1$ кВ через резистор, опір якого $R=100$ кОм. Визначити

індукцію магнітного поля B між пластинами конденсатора на відстані $r=10$ см від його осі через проміжок часу $t=1$ мс після підімкнення.

Енергія магнітного поля

358. Соленоїд містить $N=1000$ витків проводу. Сила струму в його обмотці $I=1$ А, а магнітний потік крізь переріз соленоїда $\Phi=0,1$ мВб. Визначити енергію W магнітного поля в соленоїді.

359. Струм, сила якого $I=20$ А, проходить по порожнистій тонкостінній трубі радіуса $r_1=2,5$ см і повертається по суцільному провіднику радіуса $r_2=1$ мм, прокладеному вздовж осі труби (рис. 3.68). Довжина труби $l=20$ см. Визначити енергію W магнітного поля системи.

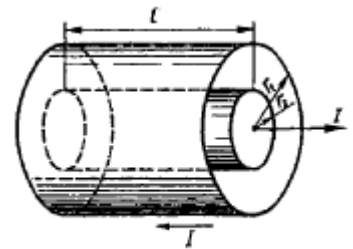


Рис. 3.68

360. На тор квадратного перерізу рівномірно намотана котушка, яка містить $N=1000$ витків (рис. 3.69). Внутрішній радіус тора $R_1=8$ см, зовнішній $R_2=10$ см. По обмотці проходить струм, сила якого $I=5$ А. Осердя є ферромагнітним. Визначити енергію W магнітного поля струму.

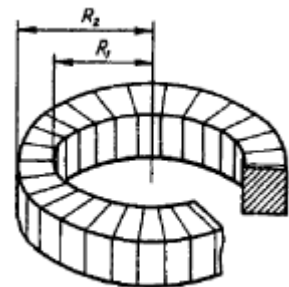


Рис. 3.69

361. Два соленоїди намотані на немагнітний каркас один на одний. Кількість витків соленоїдів $N_1=1200$ і $N_2=750$, площа поперечного перерізу $S=20$ см², довжина $l=1$ м. По обмотках соленоїдів проходять струми, сила яких відповідно $I_1=3$ А і $I_2=7$ А. Обчислити енергію W магнітного поля струмів.

362. Соленоїд завдовжки $l=0,5$ м, площа поперечного перерізу якого $S=2$ см², має індуктивність $L=0,2$ мГн. Якою має бути сила струму I , щоб об'ємна густина енергії магнітного поля всередині соленоїда $w_m=1$ мДж/м³?

Магнітне поле в речовині

Намагніченість ізотропного магнетика

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H} \quad (8.1)$$

де χ - магнітна сприйнятливість магнетика; \mathbf{H} - напруженість магнітного поля.

Зв'язок між векторами \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{J} :

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J} \quad (8.2)$$

де μ_0 - магнітна стала.

Для однорідного та ізотропного магнетика

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (8.3)$$

Зв'язок між магнітною проникністю й магнітною сприйнятливістю речовини:

$$\mu = 1 + \chi \quad (8.4)$$

Циркуляція вектора напруженості **H** магнітного поля

$$\oint_L H_l dl = \sum I \quad (8.5)$$

де $\sum I$ - алгебрична сума макроскопічних струмів (струмів провідності), які охоплюються контуром L .

Граничні умови на межі поділу двох магнетиків:

а) нормальна складова вектора **B** є неперервною

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (8.6)$$

б) тангенціальна (паралельна межі поділу) складова вектора **H** є неперервною

$$H_{1t} = H_{2t} \quad (8.7)$$

Магнітна індукція в зазорі між полюсами електромагніту

$$B = \frac{NI}{\frac{l_1}{\mu_0 \mu_1} + \frac{l_2}{\mu_0 \mu_2}} \quad (8.8)$$

де l_1, l_2 – довжини осердя й зазору вздовж осьової лінії.

363. Як впливає зовнішнє магнітне поле на рух електронів в атомах речовини?

364. Як поведуться легкі невеликі стрижні з діамагнітного (бісмут) і парамагнітного (магній) матеріалів, що вільно підвішені між полюсами електромагніту?

365. Струм, сила якого $I=4$ А, проходить уздовж колового контуру радіуса $r=20$ см, який занурено у воду. Магнітна сприйнятливість води $\chi=-0,72 \cdot 10^{-6}$. Знайти намагніченість J у центрі кола. На скільки відрізняється магнітна індукція B в центрі кола у воді порівняно з магнітною індукцією B_0 у вакуумі?

366. Довгий круглий стрижень з титану розміщено вздовж однорідного магнітного поля. Магнітна сприйнятливість титану $\chi=1,5 \cdot 10^{-5}$. Яку частину індукції сумарного магнітного поля B становить індукція магнітного поля молекулярних струмів B' ?

367. Соленоїд, що має довжину $l=20$ см, площу поперечного перерізу $S=10$ см² і кількість витків $N=400$, міститься в діамагнітному середовищі. Індуктивність його $L=1$ мГн. Обчислити індукцію магнітного поля B і намагніченість J усередині соленоїда, якщо по ньому проходить струм, сила якого $I=2$ А.

368. Вздовж осі нескінченного прямого круглого циліндра зі скла радіуса $r_0=2$ см по тонкому проводу проходить струм, сила якого $I=1$ А. Зовні Циліндра міститься повітря. Визначити напруженість магнітного поля H , індукцію B і намагніченість J у точках, що віддалені від осі на $r_1=1,5$ см і $r_2=4$ см. Магнітна сприйнятливість скла $\chi=-1,26 \cdot 10^{-6}$.

369. Площа поперечного перерізу соленоїда із залізним осердям $S=10 \text{ см}^2$. Довжина соленоїда $l=1 \text{ м}$. Визначити магнітну проникність μ матеріалу осердя, якщо магнітний потік, що пронизує цю площу, $\Phi=1,4 \text{ мВб}$. Якій силі струму, що проходить крізь соленоїд, відповідає цей магнітний потік, якщо індуктивність соленоїда $L=0,44 \text{ Гн}$?

Вказівка. Розв'язуючи задачі 369-380, використовувати графік намагнічення, зображений на рис. 3.70.

370. У соленоїд завдовжки $l=10 \text{ см}$, що має $N=300$ витків, уведено залізне осердя. По соленоїду проходить струм, сила якого $I=1 \text{ А}$. Обчислити намагніченість J заліза всередині соленоїда, якщо його магнітні властивості описані за допомогою графіка, зображеного на рис. 3.70.

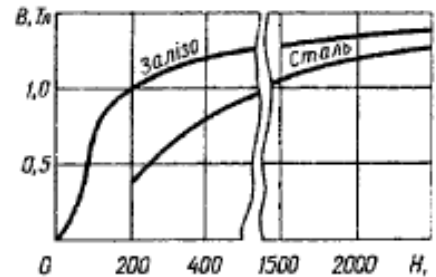


Рис. 3.70

371. Соленоїд намотано на залізне осердя, площа поперечного перерізу якого $S=5 \text{ см}^2$. При силі струму $I=5 \text{ А}$ магнітний потік $\Phi=200 \text{ мкВб}$. Визначити кількість витків, що припадають на одиницю довжини соленоїда.

372. На залізне осердя намотано соленоїд, який має $N_1=500$ витків мідного дроту. Площа поперечного перерізу осердя $S_1=5 \text{ см}^2$, його довжина $l=30 \text{ см}$. Площа поперечного перерізу дроту $S_2=1 \text{ мм}^2$. Чому дорівнюватиме індуктивність L соленоїда у разі під'єднання його до акумулятора, ЕРС якого $\mathcal{E}=1,26 \text{ В}$? Внутрішнім опором акумулятора й опором з'єднувальних провідників нехтувати.

373. На залізному осерді у вигляді тора міститься обмотка, кількість витків якої $N=700$. Середній діаметр тора $D=20 \text{ см}$, площа поперечного перерізу $S=6 \text{ см}^2$. Визначити потік магнітної індукції Φ крізь поперечний переріз осердя, магнітну проникність μ заліза, а також намагніченість J , якщо сила струму $I=0,5 \text{ А}$.

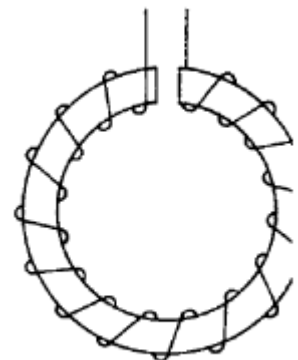


Рис. 3.71

374. На залізному кільці, середній діаметр якого $D=30 \text{ см}$ і площа поперечного перерізу $S=5 \text{ см}^2$ міститься обмотка з $N=800$ витків. В обмотці проходить струм, сила якого $I=3 \text{ А}$. У кільці зроблено поперечний проріз завширшки $l=2 \text{ мм}$ (рис. 3.71). Нехтуючи розсіянням поля біля країв прорізу, обчислити: магнітну проникність μ заліза для цих умов; потік магнітної індукції Φ крізь поперечний переріз кільця; повну енергію магнітного поля W , енергію поля в залізному кільці W_1 та в повітряному зазорі W_2 ; індуктивність L обмотки.

Вказівка. Рекомендуємо обчислення індуктивності L виконати двома способами, виразивши її через потік магнітної індукції Φ і через енергію магнітного поля W .

375. На залізне кільце середнього діаметра $D=25$ см намотано $N=1\ 200$ витків проводу. У кільці зроблено поперечний проріз, внаслідок чого утворився повітряний зазор завширшки $l_{п.з}=5$ мм (рис. 3.71). Якщо по обмотці проходить струм силою $I=2,5$ А, то напруженість магнітного поля в зазорі $H=570$ кА/м. Визначити магнітну проникність μ заліза за цих умов. Розсіянням поля біля країв зазору нехтувати.

376. Вектор індукції магнітного поля у вакуумі \mathbf{B}_0 утворює кут α_0 з нормаллю до поверхні однорідного ізотропного магнетика. Магнітна проникність магнетика μ . Визначити індукцію B магнітного поля у магнетика. Який кут α утворює вектор \mathbf{B} з нормаллю до поверхні, якщо кут α_0 вважати малим?

377. По обмотці тороїду зі сталевим осердям проходить струм, сила якого $I=2$ А. Обмотка містить $N=500$ витків. Площа поперечного перерізу тороїду $S=12$ см², середній радіус $R=30$ см. Визначити енергію магнітного поля W , яка накопичилась в осердді.

378. Визначити магнітну проникність заліза μ , якщо густина енергії магнітного поля в залізному осердді $w_m=150$ Дж/м³.

379. Встановити максимальне значення магнітної проникності μ_{\max} заліза.

380. Визначити, у скільки разів змінилася об'ємна густина енергії w магнітного поля в сталевому осердді тороїду, якщо індукція магнітного поля збільшилася від $B_1=0,5$ Тл до $B_2=1$ Тл.

381. Один з елементів шахтної автоматики - магнітний вимикач - зображено на рис. 3.72, а. U-подібне осердя зі сплаву пермалою з практично прямокутною петлею гістерезису (рис. 3.72, б) намагнічується обмоткою 1, яка ввімкнута в коло змінного струму. У вторинній обмотці 2 збуджується ЕРС індукції так, що реле 2 на виході замикається. При проходженні скіпа прикріпленний до нього магніт замикає осердя, внаслідок чого струм у вторинній обмотці зникає, реле вимикається, скіп зупиняється. Пояснити роботу такого безконтактного вимикача.

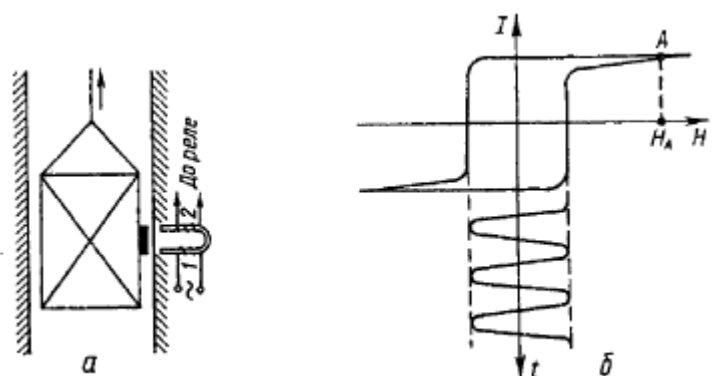


Рис. 3.72

Рівняння Максвелла. Принцип відносності в електродинаміці

Густина струму зміщення

$$\mathbf{j}_{зм} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (9.1)$$

Система рівнянь Максвелла:

а) польові рівняння в інтегральній формі

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S} \quad (9.2)$$

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S} \quad (9.2)$$

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_V \rho dV$$

б) польові рівняння в диференціальній формі

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \quad (9.3)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$$

де \mathbf{j} - густина струму; ρ - об'ємна густина заряду;

в) матеріальні рівняння для однорідних ізотропних середовищ

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \quad (9.4)$$

Значення електричного заряду частинки є однаковим в усіх інерціальних системах відліку, тобто є релятивістським інваріантом (дослідний факт).

Зв'язок між значеннями напруженості \mathbf{E} електричного та індукції \mathbf{B} магнітного полів у деякій точці системи відліку K та значеннями \mathbf{E}' та \mathbf{B}' цих величин у системі K' , яка рухається зі швидкістю v відносно системи K (перетворення полів):

$$\begin{aligned} \mathbf{E}'_{\parallel} &= \mathbf{E}_{\parallel} & \mathbf{B}'_{\parallel} &= \mathbf{B}_{\parallel} \\ \mathbf{E}'_{\perp} &= \frac{\mathbf{E}_{\perp} + [\mathbf{vB}]}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & \mathbf{B}'_{\perp} &= \frac{\mathbf{B}_{\perp} + [\mathbf{vE}]}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned} \quad (9.5)$$

Символами \parallel і \perp позначено поздовжні та поперечні відносно вектора \mathbf{v} складові векторів.

Перетворення проекцій векторів \mathbf{E} і \mathbf{B} у випадку, коли K' -система рухається в додатному напрямі осі OxK -системи:

$$\begin{aligned} E'_x &= E_x & E'_y &= \frac{E_y - vB_z}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & E'_z &= \frac{E_z + vB_y}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ B'_x &= B_x & B'_y &= \frac{B_y + vE_z/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & B'_z &= \frac{B_z + vE_y/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned} \quad (9.6)$$

Якщо треба одержати формули оберненого перетворення (від K' - до K -системи), то у формулах (9.5) і (9.6) потрібно всі штриховані величини замінити на не штриховані й навпаки, а також знак перед v .

Рівняння Максвелла

382. Індукція однорідного магнітного поля всередині циліндра радіуса $R=0,1$ м лінійно зростає з часом за законом $B=\alpha t$, де $\alpha=10^{-3}$ Тл/с. Магнітне поле напрямлене вздовж осі циліндра, поза яким поля немає. Чому дорівнюватиме напруженість вихрового електричного поля E на відстані $r=0,2$ м від осі циліндра?

383. На циліндричне залізне осердя, крізь яке проходить магнітний однорідний потік $\Phi=\Phi_0 \cos \omega t$, надіто тор з діелектрика, діелектрична проникність якого ϵ . У торі двома близькими розрізами зроблено вузький повітряний зазор (рис. 3.73). Визначити напруженість електричного поля E в зазорі в точці A залежно від відстані r до осі циліндра.

384. Непровідне тонке кільце, маса якого $m=30$ г, заряджене зарядом $q=6$ мкКл і може вільно обертатися навколо своєї осі. У початковий момент кільце перебувало в спокої, магнітного поля не було. Після ввімкнення однорідного магнітного поля, направленого перпендикулярно до площини кільця, індукція магнітного поля почала зростати за законом $B(t)=\alpha t^2$, де $\alpha=10^{-2}$ Тл/с². Встановити кутову швидкість обертання ω кільця через $t=3$ с.

385. Поза циліндром радіуса $R=10$ см індукція однорідного магнітного поля лінійно зростає з часом за законом $B_0=\alpha t$, де $\alpha=10^{-3}$ Тл/с. Як має змінюватися з часом індукція однорідного магнітного поля B усередині циліндра (рис.3.74), щоб електрон рухався по колу радіуса $r=15$ см? У

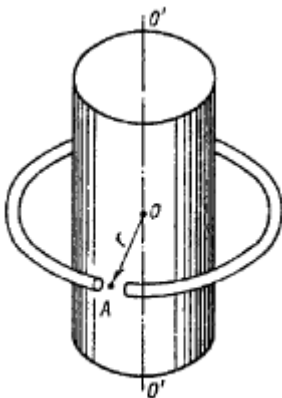


Рис. 3.73

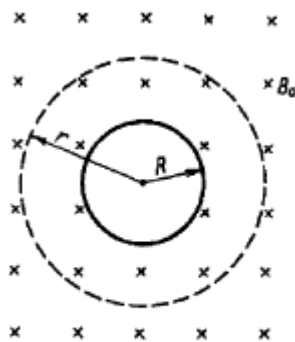


Рис. 3.74

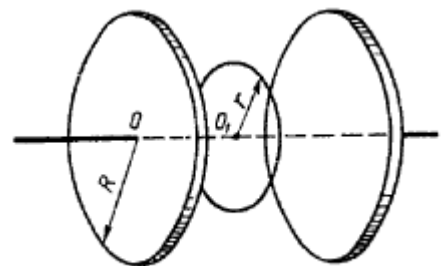


Рис. 3.75

початковий момент часу швидкість електрона дорівнювала нулеві.

386. Напруженість однорідного електричного поля всередині плоского конденсатора – двох круглих пластин радіуса $R=10$ см (рис. 3.75) – лінійно зростає з часом за законом $E=\alpha t$, де $\alpha=9 \cdot 10^{10}$ В/(м·с). Чому дорівнюватиме індукція магнітного поля B усередині конденсатора на відстані від його осі: а) $r_1=5$ см; б) $r_2=15$ см?

387. Під час заряджання конденсатора з круглими паралельними пластинами радіуса $R=10$ см по провіднику, що з'єднує пластини, проходить струм силою $I=0,5$ мА за час $t=2$ мс (рис. 3.75). Обчислити напруженість E електричного та індукцію B магнітного полів у просторі між пластинами на відстані $r=5$ см від його осі.

388. Напруга на обкладках круглого плоского конденсатора зростає з часом за законом $U=at$. Радіус обкладок R , відстань між ними d . По осі конденсатора встановлено невеликий циліндр з діелектрика радіуса $r<R$ з діелектричною проникністю ϵ . Визначити індукцію магнітного поля B_0 на бічній поверхні циліндра і $B_{кр}$ на краю конденсатора.

389. Середовище між обкладками плоского конденсатора ємністю C має діелектричну проникність ϵ і невелику електропровідність σ . До обкладок конденсатора прикладена різниця потенціалів U , після чого вони були ізольовані. Встановити закон зміни заряду з часом на кожній з обкладок і силу струму зміщення $I_{зм}$, який проходить крізь конденсатор.

390. Довгий прямий соленоїд має n витків на одиницю довжини. По ньому проходить змінний струм, сила якого $I=I_0 \sin \omega t$. Визначити густину струму зміщення $j_{зм}$ як функцію відстані r від осі соленоїда. Радіус перерізу соленоїда R .

391. Точковий заряд $q>0$ рухається з нерелятивістською швидкістю $v=\text{const}$. Визначити густину струму зміщення $j_{зм}$, що утворюється зарядом поблизу траєкторії на відстані r від нього.

392. Чи існує такий розподіл електричних зарядів, що створює електростатичне поле з напруженістю: а) $\mathbf{E}=x\mathbf{i} + (3x^2 - 3y^2)\mathbf{j}$; б) $\mathbf{E}=kx\mathbf{i} - ky\mathbf{j}$?

393. Чи може існувати електромагнітне поле, яке виражене рівняннями: $E_x = E_y = 0$; $E_z = \frac{1}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} \cos(y - ct)$; $B_x = \sqrt{\frac{\mu_0}{4\pi}} \cos(y - ct)$; $B_y = B_z = 0$?

Принцип відносності в електродинаміці

394. Які дослідні факти підтверджують незалежність значення заряду від швидкості руху його носіїв?

395. Заряджена частинка рухається зі сталою швидкістю. Чим відрізняються електричні поля частинки в системі спокою частинки та в лабораторній системі відліку?

396. У вакуумі рухається заряджена частинка зі сталою швидкістю відносно K -системи. При цьому в деякій точці простору в цій системі спостерігається змінне з часом електричне поле. Чи означає це, що вказана частинка випромінює електромагнітні хвилі? Чи зміниться відповідь, якщо частинка рухатиметься зі сталою швидкістю в середовищі?

397. Електроємність плоского конденсатора в системі відліку, відносно якої він перебуває в стані спокою, $C=3$ пФ. Визначити його електроємність C' у системі відліку, яка рухається відносно конденсатора зі швидкістю $v=0,2$ c так, що вектор \mathbf{v} залишається паралельним обкладкам конденсатора.

398. Різниця потенціалів між обкладками плоского конденсатора в системі відліку, відносно якої він перебуває у стані спокою, $U=25$ В. Яка різниця потенціалів U' між обкладками цього самого конденсатора в системі, відносно якої він рухається зі швидкістю $v=0,2$ c перпендикулярно до його обкладок?

399. У прискорювачі на зустрічних пучках електрони рухаються назустріч один одному. Енергія електронів у кожному з пучків $E=3,5$ ГеВ. У скільки разів n відрізняються густини струмів у кожному з пучків у лабораторній системі та в системі відліку, зв'язаній з одним із пучків?

400. Паралельно зарядженій нитці зі швидкістю $v=0,8$ c відносно нитки рухається α -частинка. Визначити силу F' , що діє на α -частинку в системі відліку, в якій частинка перебуває в спокої, а також силу F у системі спокою нитки. Уздовж нитки розподілений позитивний заряд з лінійною густиною $\tau=25$ мкКл/м у системі спокою нитки. Відстань, на якій перебуває α -частинка від нитки, $r=5$ мм.

401. Уздовж довгого стрижня рівномірно розподілений заряд, лінійна густина якого $\tau=5$ мкКл/м. Обчислити напруженість електричного поля E' та індукцію магнітного поля B' у системі відліку, яка рухається відносно стрижня зі швидкістю $v=0,6$ c уздовж його осі, у точці, що лежить на відстані $r=5$ см від осі стрижня.

402. Електричний заряд рівномірно розподілений по об'єму парафінового циліндра радіуса $R=2$ см. Об'ємна густина заряду циліндра $\rho=2$ мКл/м³. Циліндр рухається вздовж своєї осі зі швидкістю $v=0,4$ c відносно лабораторної системи відліку. Визначити модулі й напрями векторів напруженості електричного та індукції магнітного полів у лабораторній системі відліку в точках, що лежать від осі циліндра на відстані: а) $r_1=1,5$ см; б) $r_2=2,5$ см.

403. В інерціальній K -системі у стані спокою міститься диполь, електричний момент якого $p_e=0,1$ нКл·м. Обчислити напруженість E' електричного та індукцію B' магнітного полів в інерціальній K' -системі, яка рухається відносно K -системи зі сталою швидкістю $v=0,6$ c перпендикулярно до електричного моменту диполя, у точці, що лежить: а) на осі диполя на відстані $r_1=1$ м від його центра; б) на прямій, яка перпендикулярна до осі диполя й проходить через його центр, на відстані $r_2=1$ м від центра.

404. Уздовж нескінченної провідної площини проходить поверхневий струм. Сила струму, яка припадає на одиницю довжини площини в

напрямі, перпендикулярному до напрямку струму, $J=1$ кА/м. Застосувавши формули перетворення полів, визначити індукцію магнітного поля B , яке створюється таким плоским струмом.

405. Коловий провідник зі струмом радіуса $R=5$ см і магнітним моментом $p_m=1,5$ А·м² перебуває у стані спокою в лабораторній системі відліку. Визначити напруженість E' електричного та індукцію B' магнітного полів у системі відліку, яка рухається відносно провідника зі швидкістю $v=20$ м/с перпендикулярно до його осі, у точці, що лежить на осі колового провідника на відстані $r=15$ см від його центра. Вважати, що електричного поля провідника в його системі спокою немає.

406. Однойменні точкові електричні заряди q_1 і q_2 рухаються паралельно один одному зі швидкостями v_1 і v_2 . Визначити силу, з якою діє перший заряд на другий у лабораторній системі відліку в той момент часу, коли відстань між ними є найменшою.

407. Довгий соленоїд, сила електричного струму в якому $I=0,2$ А, кількість витків $n=10^3$ на одиницю довжини, рухається перпендикулярно до своєї осі зі швидкістю $v=3 \cdot 10^7$ м/с. Визначити індукцію магнітного поля B соленоїда в системі відліку, відносно якої він рухається. Чому дорівнює і як напрямлена напруженість електричного поля E , яке спостерігається в цій системі?

408. Довгий прямий провідник зі струмом, сила якого $I=2,5$ А, рухається зі швидкістю $v=3$ м/с відносно лабораторної системи відліку вздовж напрямку струму. Обчислити напруженість E електричного та індукцію B магнітного полів у точці, що лежить на відстані $r=5$ см від провідника у лабораторній системі відліку. Вважати, що електричного поля в системі спокою провідника немає.

409. В інерціальній K -системі існують два взаємно перпендикулярних поля - електричне, напруженість якого $E=30$ кВ/м, та магнітне, індукція якого $B=25$ мкТл. З якою швидкістю v має рухатись K' -система, щоб у ній реєструвалося: а) тільки електричне поле; б) тільки магнітне поле? Вважати, що вектор v перпендикулярний до E і B .

410. На рис. 3.76 зображено так звану уніполярну машину, основою якої є постійний циліндричний магніт, що обертається навколо своєї осі. Якщо за допомогою контактів A і B , які ковзають по поверхні магніту, з'єднати провідник з віссю та поверхнею магніту, то вздовж провідника AB пройде струм. Як можна пояснити виникнення цього струму?

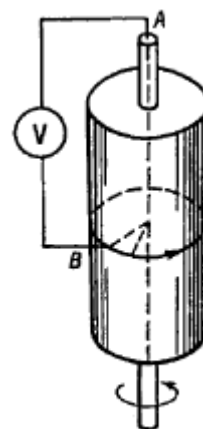


Рис. 3.76

Питання для контролю

1. Предмет та методи електрики і магнетизму.
2. Короткий історичний огляд вчення про електрику і магнетизм.
3. Розвиток електроенергетики в Україні.
4. Електричний заряд. Властивості електричного заряду. Два види заряду. Дискретність заряду.
5. Інваріантність і закон збереження заряду.
6. Елементарний заряд. Експериментальне визначення заряду електрона.
7. Найпростіші заряджені тіла: модель точкового і неперервно розподіленого заряду.
8. Взаємодія точкових заряджених тіл. Закон Кулона.
9. Електричне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції.
10. Поле диполя.
11. Потік вектора напруженості. Теорема Гаусса.
12. Робота сил електростатичного поля. Потенціальний характер електростатичного поля.
13. Циркуляція вектора напруженості.
14. Потенціал та різниця потенціалів.
15. Рівняння Пуассона і Лапласа.
16. Потенціал та напруженість поля, створеного точковим зарядженим тілом.
17. Потенціал та напруженість поля, створеного системою точкових заряджених тіл.
18. Потенціал та напруженість поля, створеного диполем.
19. Розподіл зарядів у провіднику.
20. Провідники в електричному полі. Еквіпотенціальність поверхні провідника.
21. Напруженість поля біля поверхні провідника та її зв'язок з поверхневою густиною заряду.
22. Електризація через вплив. Врахування поля наведених зарядів. Електрофорна машина.
23. Електроємність. Конденсатори.
24. Діелектрики. Полярні і неполярні молекули. Вільні і зв'язані заряди.
25. Поляризація діелектриків.
26. Діелектрична проникність і сприйнятливість, вектор електричного зміщення.
27. Неполярні діелектрики, теорія їх поляризації.
28. Полярні діелектрики, теорія їх поляризації.
29. Електричне поле на межі двох діелектриків. Граничні умови.
30. Теорема Гаусса для поля в діелектрику.
31. Сегнетоелектрики. Електрети. П'єзоелектрики.
32. Енергія системи нерухомих точкових зарядів.
33. Енергія системи зарядженого провідника.

34. Енергія конденсатора.
35. Енергія і густина енергії електростатичного поля. Вектор Умова.
36. Рух зарядів в електричному полі, електричний струм. Рівняння неперервності.
37. Умова стаціонарності струму.
38. Закон Ома для ділянки кола.
39. Закон Ома в диференціальній та інтегральній формах.
40. Сторонні сили. Електрорушійна сила.
41. Закон Ома для неоднорідної ділянки і повного кола.
42. Робота і потужність постійного струму.
43. Закон Джоуля-Ленца.
44. Розгалужені кола, правила Кірхгофа та їх застосування.
45. Термоелектронна емісія. Залежність струму насичення від температури.
46. Двохелектродні та трьохелектродні лампи і їх застосування.
47. Електронно-променева трубка. Поняття про вторинну та автоелектронну емісії.
48. Електроліти. Електролітична дисоціація.
49. Електропровідність електролітів. Закон Ома для електролітів.
50. Електроліз. Закони Фарадея. Хімічні джерела струму.
51. Використання електролізу.
52. Процеси іонізації і рекомбінації.
53. Несамостійний розряд в газах.
54. Самостійний розряд в газах.
55. Вольт-амперна характеристика газового розряду.
56. Види розрядів (тліючий, дуговий, іскровий, коронний). Блискавка.
57. Поняття про плазму.
58. Використання газових розрядів. Катодні промені.
59. Класифікація твердих тіл (провідники, діелектрики, напівпровідники).
60. Електричний струм у металах. Досліди Мандельштама і Папалексі, Толмена і Стюарта.
61. Класична електронна теорія провідності металів.
62. Виведення законів Ома, Джоуля-Ленца. Закон Відмана-Франца.
63. Залежність опору металів від температури. Надпровідність.
64. Поняття про квантову теорію провідності твердих тіл.
65. Провідність напівпровідників. Власна і домішкова провідність напівпровідників.
66. Застосування напівпровідників.
67. Робота виходу електрона з металу.
68. Контактна різниця потенціалів. Контактні явища в напівпровідниках.
69. Напівпровідникові діоди і транзистори.
70. Термоелектричний струм. Прямі та обернені термоелектричні явища. Термоелектричні генератори.
71. Магнітна взаємодія струмів. Закон Ампера. Магнітне поле електричного струму.
72. Індукція і напруженість магнітного поля. Закон Біо-Савара-Лапласа.

73. Магнітне поле прямого, колового і соленоїдного струмів.
74. Циркуляція вектора індукції магнітного поля. Закон повного струму.
75. Контур із струмом у магнітному полі. Магнітний момент струму. Дія електричного і магнітного полів на рухомий заряд.
76. Сила Лоренца.
77. Визначення питомого заряду електрона. Мас-спектрометр.
78. Ефект Холла і його застосування.
79. Електронний мікроскоп.
80. Прискорювачі заряджених частинок.
81. Магнітогідродинамічні генератори.
82. Магнітне поле рухомого заряду. Відносний характер електричного і магнітного полів.
83. Робота при переміщенні провідника зі струмом у магнітному полі.
84. Магнітний потік.
85. Магнетики і намагнічування їх. Вектор намагнічення.
86. Магнітне поле в магнетиках. Вектор напруженості магнітного поля.
87. Магнітна сприйнятливість і проникність магнетиків.
88. Зв'язок індукції і напруженості магнітного поля в магнетиках.
89. Магнітомеханічні і механомагнітні явища. Досліди Ейнштейна, де Гааза і Барнетта.
90. Діа-, пара- і ферромагнетики. Магнітний гістерезис.
91. Роботи Столетова. Точка Кюрі. Постійні магніти.
92. Нові магнітні матеріали.
93. Магнітні кола. Магніторухійна сила. Закони магнітного кола.
94. Досліди Фарадея. Електрорухійна сила індукції.
95. Закон електромагнітної індукції Фарадея і правило Ленца.
96. Вихрові струми. Скін-ефект.
97. Самоіндукція і взаємоіндукція. Електрорухійна сила самоіндукції.
- Індуктивність.
98. Енергія магнітного поля струму.
99. Енергія і густина енергії магнітного поля.
100. Отримання змінної ЕРС. Квазістаціонарний струм.
101. Діючі і середні значення струму і напруги.
102. Опір, індуктивність і ємність у колі змінного струму.
103. Закон Ома для кола змінного струму.
104. Векторні діаграми і метод комплексних амплітуд.
105. Резонанс напруг, резонанс струмів.
106. Робота і потужність змінного струму.
107. Передавання електричної енергії. Трансформатор.
108. Електричний коливальний контур. Власні електричні коливання.
- Формула Томсона. Згасаючі коливання.
109. Вимушені електричні коливання. Резонанс. Добротність і смуга пропускання контуру.
110. Електричні автоколивання. Автогенератор на транзисторі.
111. Вихрове електричне поле. Досліди Роуланда і Ейхенвальда.

- 112. Електромагнітне поле. Струм зміщення.
- 113. Система рівнянь Максвелла в інтегральній і диференціальній формах.
- 114. Плоскі електромагнітні хвилі в однорідному середовищі, швидкість їх поширення.
- 115. Випромінювання електромагнітних хвиль. Досліди Герца. Вібратор Герца.
- 116. Енергія електромагнітної хвилі. Потік енергії. Вектор Умова-Пойнтінга.
- 117. Поняття про системи передачі електромагнітної енергії.
- 118. Електромагнітні хвилі вздовж проводів. Тиск електромагнітних хвиль. Стоячі хвилі і резонанс у відрізках довгих ліній.
- 119. Винайдення радіозв'язку. Принцип радіозв'язку і радіолокації.
- 120. Шкала електромагнітних хвиль.

Література

1. Біленко І.І. Фізичний словник. – 2-ге вид., перероб. і допов. – К.: Вища школа, 1993. – 319 с.
2. Бурсиан Э.В. Физические приборы: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. факультетов педагогических институтов. – М.: Просвещение, 1984. – 271 с.
3. Бушок Г.Ф., Півень Г.Ф. Курс фізики. Ч. I: Навч. посібник для пед. інститутів. – 2-е вид., перероб. і доп. – К.: Вища школа, 1981. – 408 с.
4. Бушок Г.Ф., Півень Г.Ф. Курс фізики. Ч. II: Навч. посібник для пед. інститутів. – К.: Вища школа, 1972. – 236 с.
5. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. - М.: Наука, 1985г. - 384с.
6. Гофман Ю.В. Законы, формулы, задачи физики. Справочник. – К.: Наукова думка, 1977. – 576 с.
7. Грабовський Р.И. Курс физики: (Для с.-х. ин-тов) – 5-е изд., перераб. и доп. –М.: Высшая школа, 1980. – 607 с.
8. Гурский И.П. Элементарная физика с примерами решения задач: Учебное пособие, изд. 2-е, перераб. и дополн., М.: Наука, 1976. - 464 с.
9. Детлаф А.А., Яворський В.М. Курс физики. - М.: Высшая школа, 2000. – 718 с.
10. Дмитрієва В.Ф. Фізика: Навч. посібник /За ред. В.А. Прокоф'єва; Пер. з рос. А.С. Кривошия. – К.: Вища школа, 1992. – 448 с.
11. Доброневский О.В. Справочник по радиоэлектронике. К.: Вища школа, 1978. – 360 с.
12. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. К.: Наукова думка, 1986. – 560 с.
13. Загальна фізика. Лабораторний практикум: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. - К.: Вища школа, 1992. - 509 с.
14. Загальна фізика: Лабораторний практикум: Навчальний посібник /В.М. Барановський, П.В. Бережний, І.Т. Горбачук та ін.; За заг. ред. І.Т. Горбачука. – К.: Вища школа, 1992. – 509 с.
15. Загальний курс фізики. Збірник задач: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. - К.: Вища школа, 1993. - 359 с.
16. Загальний курс фізики: Збірник задач/ І.П. Гаркуша, І.Т. Горбачук, В.П. Курінний та ін./ За заг.ред. І.П. Гаркуші. - К.: Техніка., 2003.- 560 с.
17. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1985.- 576с.
18. Касаткина И.Л. Репетитор по физике. Теория. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика. Электромагнетизм. /Под ред. доцента Т.В. Шкиль. – Ростов на Дону: изд-во «Феникс», 2003. – 608 с.
19. Касаткина И.Л. Репетитор по физике. Электромагнетизм. Колебания и волны. Оптика. Элементы теории относительности. Физика атома и атомного ядра. Изд-е 4-е исправленное и переработанное. /Под ред. Т.В. Шкиль. – Ростов на Дону: изд-во «Феникс», 2004. – 832 с.

20. Касперський А.В., Богданов І.Т. Електрика і магнетизм. Збірник задач, вправ і тестів. - К.: Четверта хвиля, 2006. - 248с.
21. Коршак Є.В., Гончаренко С.У., Коршак Н.М. Методика розв'язування задач з фізики. Практикум. - К.: Вища школа, 1976. - 240с.
22. Крижанівський В.Г. Фізика: довідник школяра і студента. – Донецьк: ТОВ ВКФ «БАО», 2004. – 416 с.
23. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. М.: Мир, 1985. – 520 с.
24. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики. У 3 т. Т. 2: Електрика і магнетизм: Навч. посібник для студентів вищих техн. і пед. закладів освіти. /І.М. Кучерук, І.І. Горбачук, Л.П. Луцик; За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 2001. – 452 с.
25. Садовий А.І., Лега Ю.Г. Основи фізики з задачами і прикладами їх розв'язування: Навчальний посібник. – К.: Кондор, 2003. – 384 с.
26. Сборник задач по общему курсу физики. Под ред. Цедрика М.С. М.: Просвещение, 1989 г. - 271с.
27. Сергієнко В.П. ГДІ. Курс фізики: Навчальний посібник. – К.: Майстер-клас, 2006. – 368 с.
28. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. - М.: Наука, 1977. - 687 с.
29. Сиротюк В.Д. Основні положення фізики. Посібник-довідник./ В.Д. Сиротюк, А.М. Сільвейстр, М.О. Моклюк. – Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2013. – 526 с.
30. Січкарь Т.Г., Касперський А.В. Електрика і магнетизм. Практичні заняття. Навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей. Київ: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2007. - 164с.
31. Сусь Б.А., Шут М.І. Проблеми дидактики фізики у вищій школі. - К.: ВЦ "Просвіта", 2003. - 155с.
32. Физический энциклопедический словарь /Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
33. Чолпан П.П. Основи фізики: Навчальний посібник: Пер. з рос. – К.: Вища школа, 1995. – 488 с.
34. Шут М.І., Сташкевич О.М., Касперський А.В., Січкарь Т.Г. Електрика і магнетизм. - К.: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2002. - 236 с.
35. Шут М.І., Бережний П.В., Касперський А.В. Мова фізики. Довідниковий навчальний посібник. К.: 2000. – 37 с.
36. Яворский Б.Я., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1968. – 940 с.

Предметний покажчик

- Абсолютна магнітна проникність середовища 105
Абсолютний показник заломлення середовища 115
Автоколювання 72
Автотрансформатори 69
Активний опір 111
Акумулятори 35
- Бетатрон 64
Блискавка 52
- Вакуум 45
Валентні електрони 38
Ватметр 34
Вектор електричної індукції (електричного зміщення) 83
Взаємна енергія двох струмів 196
Взаємна індуктивність контурів 195
Взаємоіндукція 68
Вибірковість 78
Вимушені електричні коливання 71
Вихрове (індукційне) електричне поле 26
Вібратор Герца 74
Відносна магнітна проникність середовища 105
Вільні заряди 24
Вільні коливання 71
Власна провідність напівпровідників 41
Властивості електромагнітних хвиль 78
Вольтметр 28
Вторинна емісія 46
- Гальванічні елементи 35
Гальванометр 32
Гальванотехніка 49
Генератор незатухаючих коливань 72
Генератор постійного струму 68
Граничні умови на межі поділу двох діелектриків 151
Граничні умови на межі поділу двох магнетиків 202
Густина енергії магнітного поля 109
Густина потоку випромінювання 116
Густина струму 94, 165
Густина струму в металах 165
- Густина струму зміщення 204
Гучномовці 59
- Двохнапівперіодний випрямляч 68
Дебаївський радіус екранування 168
Детектування 76
Джерело струму 32
Диференціальне рівняння реальних (затухаючих) коливань 71
Диференційне рівняння коливального контуру 71
Діамагнетизм 62
Діамагнетики 62
Діелектрики 29, 37
Діелектрична проникність середовища 30, 89
Діод 46
Діюче значення ЕРС змінного струму 111
Діюче значення напруги змінного струму (ефективне) 111
Діюче значення сили змінного струму (ефективне) 111
Для постійного струму
Добротність коливального контуру 115
Довжина електромагнітної хвилі 115
Додатковий опір 37
Домени 62
Домішкова провідність напівпровідників 41
Дросель 65
Другий закон Фарадея 168
Дуговий розряд 51
- Еквівалентна електропровідність 167
Еквіпотенціальна поверхня і лінії 28
Електрети 30
Електризація тіла 23
Електрична ємність провідника 89
Електричне зміщення 151
Електричне коло 33
Електричне поле 25
Електричне поле рівномірно зарядженої сферичної поверхні 83
Електричний двигун 58
Електричний диполь 29
Електричний заряд 22-24, 81

Електричний струм 31
 Електровакуумний прилад 46
 Електровимірвальні прилади 56
 Електроємність конденсатора 90
 Електроліз 48
 Електроліти 48
 Електролітична дисоціація 48
 Електромагніт 55
 Електромагнітна хвиля 73
 Електромагнітне поле 65
 Електромагнітні коливання 70
 Електрометалургія 49
 Електрометр 23
 Електронна теорія провідності металів 38
 Електронна хмара 99
 Електронний осцилограф 80
 Електронний пучок 46
 Електронно-променева трубка 47
 Електропровідність провідника 94
 Електрорушійна сила 97
 Електрорушійна сила індукції 106
 Електроскоп 23
 Електростатична теорема Гаусса 137
 Електростатичне поле між двома
 різномірно зарядженими паралельними
 нескінченними площинами 83
 Електростатичне поле нескінченно
 довгого прямого рівномірно зарядженого
 циліндра 84
 Електростатичне поле рівномірно
 зарядженої нескінченної площини 83
 Електростатичний захист 28
 Елементарна робота з переміщення
 провідника зі струмом у магнітному полі
 187
 Енергетичний рівень 40
 Енергія взаємодії системи точкових
 зарядів 155
 Енергія відокремленого зарядженого
 провідника 155
 Енергія електричного поля 93
 Енергія зарядженого конденсатора 155
 Енергія магнітного поля соленоїда з
 струмом 109
 Енергія магнітного поля струму 196
 ЕРС взаємної індукції 195
 ЕРС електромагнітної індукції (закон
 Фарадея) 195
 ЕРС індукції 110
 ЕРС індукції, що виникає в рамці, яка
 містить N витків й обертається з кутовою
 швидкістю ω в однорідному магнітному
 полі 195
 ЕРС самоіндукції 195
 Ефект Холла 61
 Ємнісний опір 112
 Ємність батареї конденсаторів у разі
 послідовного і паралельного з'єднань
 відповідно 147
 Ємність конденсаторів 147
 Заземлення 37
 Закон Ампера 125
 Закон Біо-Савара-Лапласа 125
 Закон Біо-Савара-Лапласа 185
 Закон Джоуля-Ленца 120, 166
 Закон Джоуля-Ленца в диференціальній
 формі 166
 Закон електромагнітної індукції 126
 Закон збереження електричного заряду
 117
 Закон Кулона 117, 136
 Закон Ома 166
 Закон Ома в диференціальній формі 120,
 166
 Закон Ома для ділянки кола 120
 Закон Ома для електролітів 167
 Закон Ома для змінного струму 127
 Закон Ома для неоднорідної ділянки кола
 120
 Закон Ома при малих густинах струму,
 який проходить у газі 168
 Закон самоіндукції 127
 Закони Вольта 123
 Закони електролізу 123
 Закритий коливальний контур 74
 Залежність густини струму насичення від
 температури (формула
 Річардсона-Дешмана) 167
 Залежність питомого опору від
 температури 166
 Занулення 70
 Запобіжники 36
 Застосування електролізу 48
 Зв'язані заряди 25

- Зв'язок магнітної індукції B і
напруженості H магнітного поля 185
- Зв'язок між магнітною проникністю й
магнітною сприйнятливістю речовини
201
- Зв'язок між напруженістю E
електростатичного поля й потенціалом ϕ
138
- Змінний струм 66
- Зовнішні електрони 38
- Ізольована система 117
- Індуктивний опір 111
- Індуктивність 108
- Індуктивність довгого соленоїда та
тонкого тороїду 195
- Індуктивність контуру 108
- Індуктивність соленоїда 108
- Індукційне електричне поле 64
- Індукційний струм 107
- Індукція всередині нескінченно довгого
соленоїда 103
- Індукція магнітного поля 100
- Індукція магнітного поля колового струму
102
- Індукція магнітного поля прямого струму
102
- Інтенсивність 115
- Іони 48
- Іонізація газу 50
- Іонний зв'язок 48
- Іскровий розряд 51
- Квантова теорія провідності металів 40
- Китичний розряд 51
- Кількість електрики, що проходить у
контурі під час зміни потокозчеплення
195
- Кількість пар іонів, які щосекунди
рекомбінують в одиниці об'єму газу 168
- Класична електронна теорія провідності
металів 39
- Ковалентний зв'язок 41
- Коерцитивна сила 63
- Коефіцієнт корисної дії електричного кола
99
- Коефіцієнт корисної дії трансформатора
113
- Коефіцієнт потужності 113
- Коефіцієнт трансформації 113
- Коливальний контур 71
- Конденсатор 29
- Консервативні сили 85
- Контактна різниця потенціалів 99
- Коронний розряд 51
- Коротке замикання 36
- Лінії вектора напруженості (силові лінії)
27
- Лінії магнітної індукції 53
- Лінійна густина заряду 81
- Лінійна, поверхнева та об'ємна густини
зарядів 136
- Люмінофори 46
- Магнетики 61
- Магнітна індукція в зазорі між полюсами
електромагніту 202
- Магнітне насичення 63
- Магнітне поле 53
- Магнітний момент 105
- Магнітний потік 105, 110
- Магнітні поля найпростіших систем 185
- Магнітогідродинамічний генератор 60
- Магнітожорсткі феромагнетики 63
- Магнітом'які феромагнетики 63
- Магнітометри 55
- Магнітострикція 63
- Максимальне (амплітудне) значення
електрорушійної сили 110
- Мас-спектрографи 59
- Мас-спектрометри 59
- Металічний зв'язок 38
- Миттєві значення сили струму 196
- Мікроелектроніка 45
- Мікрофон 59
- Місток Уїтстона 36
- Модуляція 76
- Момент сил, що діють на диполь в
однорідному електричному полі 137
- Момент сил, що діють на контур зі
струмом у магнітному полі 186
- Надпровідність 33
- Намагніченість ізотропного магнетика 201
- Намагнічування магнетика 61

Напівпровідники 37, 41
 Напівпровідникові діоди 44
 Напівпровідникові тріоди (транзистори) 44
 Напівпровідникові фотоелементи 44
 Напруга 87
 Напруженість електричного поля в даній точці 82, 147
 Напруженість електростатичного поля 136
 Напруженість електростатичного поля точкового заряду q 136
 Напруженість магнітного поля 102
 Напруженість поля в однорідному та ізотропному діелектрику 151
 Неоднорідні електричні поля 27
 Несамостійний газовий розряд 51
 Нормальний елемент Вестона 35

 Об'ємна густина енергії електричного поля (густина енергії) 93, 155
 Об'ємна густина енергії електромагнітної хвилі 116
 Об'ємна густина енергії магнітного поля 109, 196
 Об'ємна густина заряду 82
 Однонапівперіодний випрямляч 68
 Однорідне магнітне поле 53
 Омметр 33
 Опір однорідного середовища 167
 Опір провідника 95, 166
 Опір провідників при послідовному й паралельному з'єднаннях відповідно 166
 Основні властивості електричного поля 26
 Осцилограф 47
 Очищення (рафінування) металів 49

 П'єзоелектричний ефект 30
 Паливні елементи 35
 Паралельне з'єднання конденсаторів 91
 Паралельне з'єднання провідників 122
 Парамагнетизм 62
 Парамагнетики 62
 Період власних електромагнітних коливань в коливальному контурі 114
 Перший закон Фарадея 167
 Петля гістерезису 63
 Питома електропровідність 96

 Питомий опір 96
 Піроелектричний ефект 30
 Плазма 52
 Поверхнева густина заряду 82
 Поверхнева густина зв'язаних зарядів 151
 Поверхневий ефект (скін-ефект) 70
 Повна енергія електромагнітних коливань в ідеальному коливальному контурі 114
 Повний опір кола (імпеданс) 127
 Полоса пропускання 78
 Поляризація діелектрика 30
 Поляризація молекул 30
 Поляризованість ізотропного діелектрика 151
 Послідовне з'єднання конденсаторів 92
 Послідовне з'єднання провідників 121
 Постійні магніти 61
 Потенціал електричного поля в заданій точці 86
 Потенціал електричного поля, що створюється системою зарядів 88, 137
 Потенціал поля точкового диполя 137
 Потенціал поля точкового заряду в даній точці 88
 Потенціальна енергія диполя в зовнішньому полі 138
 Потенціальні поля 85
 Потенціометр 34
 Потік вектора індукції \mathbf{B} крізь довільну поверхню S 186
 Потік вектора індукції електричного поля 84
 Потік вектора напруженості \mathbf{E} крізь довільну поверхню S 137
 Потік вектора напруженості електричного поля 84
 Потокозчеплення контуру 195
 Потужність постійного струму 98, 166
 Потужність у колі змінного струму 112
 Правила Кірхгофа 122, 167
 Правило буравчика (свердлика) 103
 Правило Ленца 107
 Правило лівої руки для визначення сили Ампера 103
 Правило лівої руки для визначення сили Лоренца 104
 Правило правої руки 106
 Прилади електродинамічної системи 56

- Прилади електромагнітної системи 56
 Прилади електронної системи 57
 Прилади електростатичної системи 57
 Прилади індукційної системи 56
 Прилади магнітоелектричної системи 56
 Принцип відносності в електродинаміці 205
 Принцип суперпозиції (накладання) магнітних полів 185
 Принцип суперпозиції електростатичних полів 136
 Принцип суперпозиції полів 118
 Прискорювачами заряджених частинок 60
 Провідники 28
 Провідники 37
 Радіолокатор (радар) 80
 Резонанс 67
 Резонанс напруг 67
 Резонанс струмів 67
 Результуюча різниця потенціалів у колі (термоелектрорушійна сила) 100
 Рекомбінація (молізація) 48
 Рекомбінація 43
 Реостат 34
 Реохорд 36
 Рівень Фермі 40
 Рівняння вільних електромагнітних коливань 71
 Рівняння для автоколивальної системи 72
 Рівняння одновимірної хвилі 74
 Різниця потенціалів 87
 Різниця потенціалів U , яка виникає на кінцях провідника завдовжки l , що рухається зі швидкістю v в однорідному магнітному полі з індукцією B 195
 Різниця потенціалів на холодному спаї 100
 Робота у колі змінного струму 112
 Робота виходу 99
 Робота для переміщення замкнутого контуру зі струмом у магнітному полі 187
 Робота сил електростатичного поля для переміщення заряду 85, 138
 Робота струму 98, 166
 Розходження між класичною теорією електропровідності і дослідними фактами 40
 Самостійний газовий розряд 51
 Сегнетоелектрики 30
 Сила Ампера 103, 186
 Сила взаємодії двох прямих, нескінченно довгих паралельних провідників зі струмами 186
 Сила Лоренца 104, 186
 Сила постійного струму у металевому провіднику 94
 Сила притягання між двома пластинами зарядженого плоского конденсатора 155
 Сила струму 93, 165
 Сила, що діє в електричному полі на одиницю площі межі поділу двох діелектриків 156
 Сила, що діє на диполь у неоднорідному електричному полі 137
 Сила, що діє на одиницю площі поверхні зарядженого провідника, оточеного рідким або газоподібним діелектриком 155
 Сили, що діють в електричному полі 155
 Система рівнянь Максвелла 204
 Соленоїд 54
 Сонячна батарея 45
 Стала Фарадея 125
 Стійкість приймання 78
 Сторонні заряди 25
 Сторонні сили 32, 97
 Струми Фуко 64
 Телебачення 81
 Телефон 58
 Температурний коефіцієнт опору 95
 Теорема Гаусса 119
 Теорема Гаусса для вектора \mathbf{B} 186
 Теорема Гаусса для електростатичного поля в діелектриках 151
 Теорія Максвелла 66
 Термобатарея 100
 Термоелектронна емісія 46
 Термоопори (термістори) 44
 Термопара 100
 Тліючий розряд 51
 Точковий електричний заряд 25
 Трансформатори 68
 Триелектродна лампа (тріод) 47

Узагальнена сила Лоренца 66	Циркуляція вектора <i>B</i> магнітного поля 186
Умова ідеальності плазми 168	Циркуляція вектора напруженості
Умова статистичної рівноваги в газі під час несамотійного розряду 168	електростатичного поля 137
	Циркуляція вектора напруженості <i>H</i> 202
	Цифрові прилади 57
Фазова швидкість електромагнітної хвилі 75	Час проходження сигналу до цілі і назад 80
Феромагнетизм 62	Чутливість 78
Фізичний зміст електроємності:	
Формула для амплітуди та резонансної частоти 72	Шкала електромагнітних хвиль 79
Формула Томсона 114	Шунт 36
Фотоелектронна емісія 46	
Фоторезистори (фотоопори) 44	Явище гістерезису 63
Фронт хвилі 75	Явище електромагнітної індукції 28, 64
	Явище Зеебека 100
Хімічні джерела струму 35	Явище Пельтьє 100
Холівська напруженість 61	Явище резонансу 72
Холлівська поперечна різниця потенціалів 186	Якість електровимірювальних приладів 57
	Якість звучання 78

Навчальне видання

**Микола Олексійович Моклюк
Анатолій Миколайович Сільвейстр**

**ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА.
Електрика і магнетизм**

Навчальний посібник

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Вінницького державного педагогічного університету
імені Михайла Коцюбинського
Протокол № _____ від _____ 2014 р.