

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ім. А.С.МАКАРЕНКА**

КАЛЕНИК В.І., КАЛЕНИК М.В.

**Лекційно-практичні заняття
з методики викладання окремих
тем шкільного курсу фізики**

**Частина 3
Електродинаміка**

**Навчальний посібник
для студентів фізико-математичних факультетів
педагогічних університетів**

Суми
СумДПУ ім. А.С.Макаренка
2007

УДК
ББК
К 17

Друкується згідно з рішенням ученої ради Сумського
державного педагогічного університету ім. А.С. Макаренка

Рецензенти:

Жук Ю.О. – заступник директора з наукової роботи інституту засобів навчання Академії педагогічних наук України, кандидат педагогічних наук, доцент.

Павленко А.І. – завідувач кафедри дидактики природничо-математичних дисциплін Запорізького обласного інституту післядипломної педагогічної освіти, доктор педагогічних наук, професор.

К 17 В.І.Каленик, М.В.Каленик.

Лекційно-практичні заняття з методики викладання окремих тем шкільного курсу фізики Ч.3.
Електродинаміка /Навчальний посібник. – Суми: СумДПУ ім. А.С. Макаренка, 2007. – с., іл.

ISBN

У посібнику містяться конспекти лекцій з методики викладання окремих тем шкільного курсу фізики й інструкції до практичних занять, у які входять завдання до самостійної роботи студентів з підготовки до цих занять і їх плани.

Для студентів фізико-математичних факультетів педагогічних університетів, викладачів методики навчання фізики.

**УДК
ББК**

ISBN

© Каленик В.І., Каленик М.В., 2007
© СумДПУ, 2007

Передмова

Складовою змісту методики навчання фізики – вузівського навчального предмета – є питання вивчення окремих тем шкільного курсу фізики (спеціальна методика навчання фізики).

Водночас, аналіз змісту посібників з методики навчання фізики, призначених для вчителів або студентів, указує на те, що найбільш проблемними є зміст й організація навчальних занять зі студентами, присвячених саме цій групі питань. Цьому є багато причин: періодичні зміни змісту й структури шкільного курсу фізики – його програм і відповідних навчальних посібників; різноманітність пропонованих систем уроків – способів вивчення питань програми з фізики, що є результатом творчого підходу їх авторів до організації навчального процесу; розбіжності у визначенні змісту окремих питань даної програми та інші. Проблемність цієї частини змісту методики навчання фізики в даний час зумовлена й невизначеністю багатьох питань, пов'язаних із впровадженням у загальноосвітніх навчальних закладах України профільного навчання й переходом на 12-річну загальну освіту.

У навчальних посібниках для студентів фізмат факультетів педагогічних університетів, у яких розкрито зміст лекцій і практичних занять зі спеціальної методики навчання фізики, пропонується один з варіантів подолання вказаних труднощів, який ґрунтується на досвіді роботи їх авторів.

Автори посібників даної групи виходили з наступного:

1. Істотна ознака методики навчання фізики – навчального предмета – це його спрямованість на безпосередню підготовку майбутніх учителів фізики до їх фахової професійної діяльності. Це означає, що будь-яка складова змісту даного навчального предмета повинна розглядатися в контексті організації навчального процесу з фізики в загальноосвітніх навчальних закладах і формування в студентів відповідних умінь.

2. У методиці навчання фізики – навчальному предметі – відсутня "автономізація" окремих складових її змісту. Так, питання вивчення компонентів змісту шкільного курсу фізики (одиниць цього змісту – явищ, понять, законів тощо) не тільки органічно пов'язані із загальною методикою навчання фізики, а й уміщені в зміст відповідних лекцій. У загальній методиці навчання фізики розкривається структура й зміст спільної діяльності вчителя й учнів під час вивчення будь-якого компонента змісту шкільного курсу фізики. Водночас, у ній визначені узагальнені плани цієї діяльності під час вивчення конкретних груп таких компонентів – стратегії в їх вивченні [10].

Провідною ідеєю в організації лабораторних занять зі шкільного фізичного експерименту є усвідомлення того, що кожний демонстраційний або лабораторний дослід, кожна фронтальна лабораторна робота мають сенс тільки в контексті діяльності з вивчення конкретного навчального матеріалу. Тому, під час лабораторних занять, у робочих групах проведення будь-якого дослідження є елементом ділової гри – один зі студентів виконує роль вчителя, а інший – учня. У

кінці кожного заняття, по-черзі кожна робоча група підготовлює й проводить із всією підгрупою студентів весь урок або його фрагмент з використанням фізичних дослідів [8, 9].

3. Студент повинен мати можливість скористатися описом будь-якого компонента змісту шкільного курсу фізики, поданого у вигляді повної системи тверджень про його істотні ознаки. Це стає підґрунтям пошуку способу введення істотних ознак [11].

Таким чином, під час лекцій із загальної методики навчання фізики, лабораторних занять з навчального фізичного експерименту студенти ознайомлюються з організацією сучасного навчального процесу, стратегіями у вивченні окремих груп компонентів змісту шкільного курсу фізики, набувають певний досвід підготовки й проведення навчальних занять – застосування стратегій вивчення окремих груп компонентів до введення вказаних систем істотних ознак.

Тому, під час лекцій зі спеціальної методики навчання фізики, доцільно узагальнити зміст компонентів змісту шкільного курсу фізики, поданого в навчальній та методичній літературі.

При такому підході зміст лекцій з методики вивчення окремих тем шкільного курсу фізики не залежить від тих впливів, які пов'язані з розвитком змісту й структури навчального предмета й суб'єктивними поглядами на предмет і процес навчання авторів навчальних і методичних посібників.

На цих лекціях доцільно розглянути логічні зв'язки між питаннями окремих тем шкільного курсу фізики, які впливають на послідовність їх вивчення.

Уміння організації спільної діяльності вчителя й учнів на всіх етапах циклу навчального процесу [10] продовжує формуватися і на практичних заняттях з методики вивчення окремих тем шкільного курсу фізики. На відміну від лабораторних занять [8, 9], на яких більше уваги приділяється методиці і техніці шкільного фізичного експерименту, на цих практичних заняттях, поряд з накопиченням у студентів досвіду в організації навчального процесу, необхідно підготувати майбутніх учителів до організації навчальної діяльності учнів, пов'язаної з розв'язуванням практичних задач.

Навчальна, пізнавальна, практична задачі – назви типів задач, що є результатом їх класифікації за ознакою – їх роллю в структурі циклу навчального процесу. Одна й та сама задача може відігравати роль навчальної, пізнавальної або практичної задачі. Практичні задачі, які традиційно називають фізичними, – це задачі, для розв'язку яких в учнів є необхідні теоретичні знання й треба змогти ними скористатися в конкретній практичній ситуації.

Формування вмінь розв'язувати практичні задачі певного типу розпочинається з вивчення відповідного компоненту змісту шкільного курсу фізики, на що вказує особливість структури і змісту циклу навчального процесу – у ньому, одночасно з вивченням нового матеріалу, формуванням пізнавальних умінь здійснюється пошук способу розв'язку навчальної задачі з наступною його демонстрацією і застосуванням у різних практичних ситуаціях.

Навчальна задача орієнтована на загальний спосіб діяльності з розв'язування практичних задач, у яких застосовується компонент змісту курсу фізики, що вивчається. Це вказує на необхідність опису тієї системи дій, яка є

спільною для задач цієї групи.

Отже, практичні заняття з методики вивчення окремих тем шкільного курсу фізики мають на меті:

а) продовжити формування в студентів умінь вибору дидактичного матеріалу для введення істотних ознак понять;

б) продовжити формування в студентів умінь організації спільної діяльності вчителя й учнів у циклах навчального процесу;

в) досягти усвідомлення студентами взаємозв'язку між введенням понять й формуванням в учнів способів діяльності з їх застосування до конкретних ситуацій;

г) ознайомити студентів з методичними рекомендаціями, зокрема, з алгоритмічними приписами до розв'язування окремих типів практичних задач;

д) закріпити знання студентами змісту головних понять шкільного курсу фізики.

Дані практичні заняття поділяються на дві групи:

1) заняття, головна мета яких – визначення логіки вивчення певного компонента змісту шкільного курсу фізики;

2) заняття, головна мета яких – ознайомлення студентів з методами розв'язування груп практичних задач.

Головною особливістю організації цих занять є приділення великої уваги самостійній роботі студентів, вважаючи, що вони мають певні знання з організації навчального процесу і розв'язування практичних задач, отримавши їх на попередніх заняттях з методики навчання фізики і під час вивчення фізики в школі та загальної фізики у ВНЗ.

В організації практичних занять, на відміну від традиційної, самостійна робота студентів з теми заняття, передуює їх проведенню.

Це стає можливим при наявності даної групи навчальних посібників, у яких у першій їх частині викладено зміст лекцій, у другій – містяться інструкції до практичних занять.

Предметом діяльності на практичному занятті першої групи є методика вивчення вибраних понять з певної теми, з якими пов'язані типи практичних задач, уміння розв'язувати які доцільно сформувати в учнів.

У завданні до самостійної роботи студентів з підготовки до заняття вказано:

1. Пригадати зміст понять:

2. Запропонувати способи введення істотних ознак, того поняття, логіка вивчення якого розглядається, розв'язуючи такі пізнавальні задачі:

До понять, зміст яких повинні знати студенти, належать поняття, що входять у дану тему курсу фізики, зокрема, і те поняття, процес вивчення якого буде розглядатися.

Отже, повторюючи зміст останнього поняття, студенти усвідомлюють мету спільної діяльності вчителя й учнів у відповідному циклі навчального процесу.

Пізнавальні задачі формулюються у вигляді запитань, відповіді на які і є твердженнями про істотні ознаки, компоненту змісту курсу фізики, що вивча-

ється. Для того щоб студенти змогли запропонувати способи діяльності з введення даних істотних ознак, їм пропонується ознайомитися з відповідними параграфами підручника з фізики. Викладач, виходячи з наявних у даному університеті методичних посібників, рекомендує додаткову літературу, яка сприятиме виконанню поставлених перед студентами завдань.

У другій частині інструкції до практичного заняття описується план діяльності викладача і студентів.

До другої групи відноситься заняття, головна мета якого – ознайомлення студентів з методами розв'язування практичних задач.

У завданні до самостійної роботи студентів з підготовки до заняття вказано:

1. Повторити зміст понять:
2. Ознайомитися з методичними рекомендаціями щодо розв'язування практичних задач з теми:
3. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач:
4. Самостійно розв'язати задачі:

У другому завданні, як правило, міститься алгоритмічний припис до розв'язування задач з даної теми і приклади, які допоможуть виконати завдання із самостійного розв'язування задач під час підготовки до даного заняття і до контрольної роботи.

Після проведення практичних занять з декількох тем шкільного курсу фізики студенти виконують контрольну роботу. У цю контрольну роботу входять задачі, перелік яких наведено перед описом практичних занять даного циклу під рубрикою "Студент повинен уміти розв'язувати наступні задачі:" . У цей перелік входять задачі основних типів, зокрема, підвищеної складності.

У третьому завданні наведені приклади розв'язування задач основних типів.

У четвертому завданні вказані задачі, які студенти повинні вміти розв'язувати й продемонструвати цей розв'язок у відповідності з методичними рекомендаціями.

У другій частині інструкції вказаний план проведення заняття:

1. Повторення понять:
2. Колективний аналіз вибраних задач, що входили до завдань з підготовки до заняття.
3. Розв'язування задач з теми.

На третьому етапі заняття використовуються різні форми організації розв'язування задач: колективна, індивідуальна, змішана, коментовані вправи на місцях.

Кількість практичних занять зі спеціальної методики навчання фізики залежить від навчального часу, що виділено навчальним планом у даному університеті, але не менша тієї їх кількості, яка є в цьому навчальному посібнику.

Відсутність науково обґрунтованих загальнодержавних рекомендацій щодо мінімуму навчальних годин, які треба виділити на викладання фахового навчального предмета – методики навчання фізики, може негативно вплинути на результати відповідної навчальної діяльності студентів.

У даному навчальному посібнику наведено кількість навчальних годин, відведених на лекції й практичні заняття зі спеціальної методики навчання фізики в СДПУ ім. А.С.Макаренка. Цей час визначений навчальним планом з підготовки бакалаврів за спеціальністю "фізика і математика".

Розділ курсу фізики	Семестр	Лекції	Практичні заняття
Механіка	6	12	30
Молекулярна фізика	7	10	20
Електродинаміка	7	14	20
Оптика. Атом.	8	12	20

Указана кількість навчальних годин обмежує можливості фахової підготовки вчителів фізики. Але, і за таких умов, використовуючи запропоновані зміст й організацію навчальних занять зі спеціальної методики навчання фізики, ефективність таких занять достатньо велика.

Зміст цього навчального посібника має ряд відмінностей від попередніх, присвячених вивченню в школі елементів класичної механіки та молекулярної фізики.

1. Під час практичних занять відсутні заняття, на яких колективно аналізується логіка введення окремих компонентів змісту шкільного курсу фізики, встановлюючи зв'язок між вивченням відповідного теоретичного матеріалу із загальною системою дій, спрямованих на застосування цього матеріалу в практичних задачах з фізики.

Структури циклів навчального процесу з введення закону Кулона, напруженості і потенціалу електростатичного поля, закону Ома для повного кола, сили Лоренца наведено в додатках до змісту лекцій. Водночас у завданнях, пов'язаних з підготовкою до контрольних робіт, включено завдання, що вимагає від студентів ознайомитися з відповідними структурами циклів навчального процесу, запропонувати й описати логіку розв'язування зазначених в циклах навчальних задач. Одне з таких завдань входить до варіанту завдання контрольної роботи.

Завдання виконується після проведення практичних занять з використання відповідних понять і законів на практиці. Це дозволяє студентам, з'ясовуючи логіку розв'язування навчальної задачі, усвідомити місце пропонованої системи дій в системах дій з розв'язування комбінованих практичних задач з фізики.

2. Враховано аналогічність систем дій з розв'язування задач з механіки і комбінованих задач з електростатики (кінематики, динаміки, статички, законів збереження). Цим самим студентам показано наступність у формуванні в учнів певних систем дій, що використовуються в різних розділах шкільного курсу фізики. З такої особливості розв'язування окремих типів задач розпочинаються практичні заняття: вводиться загальна система дій з розв'язування задач на рівновагу тіл (під час аналізу питань класичної механіки дана система дій і відповідні типи задач не були розглянуті); на прикладах задач з механіки ілюструється застосування даної системи дій; використовується дана система дій для випадку рівноваги електрично заряджених тіл.

3. Під час розгляду логіки розв'язування задач з окремих тем шкільного курсу фізики доцільно було звернути особливу увагу не на загальну систему дій, а на різні способи застосування змісту одного й того самого поняття (зако-

нів). Особливо яскраво це видно на прикладі розв'язування задач з розрахунку систем конденсаторів і провідників.

4. Складаючи план написання текстів лекцій і змісту практичних занять, вимушені обмежитися в розгляді теоретичних питань і відповідних способів діяльності, враховуючи зазначений навчальний час.

В лекціях узагальнено зміст понять електродинаміки, викладені в підручниках загальної фізики (Матвеев О.М., Чолпан П.Ф., Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Яворський Б.М. та інші), шкільних підручників з фізики (Буховцев Б.Б., Гончаренко С.У., Шахмаєв М.М. та інші). Методичні рекомендації складені з урахуванням змісту задач і порад для їх розв'язку (Гольдфарб М.К., Гончаренко С.У., Балаш В.А. та інші).

ЛЕКЦІЇ

Основні поняття, закони електродинаміки
у шкільному курсі фізики

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

Електродинаміка є наукою про властивості і закономірності поведінки особливого виду матерії – електромагнітного поля, яке здійснює взаємодію між електрично зарядженими тілами.

У сучасній електродинаміці можна виділити три основні частини: класичну електродинаміку, квантову електродинаміку і електродинаміку рухомих середовищ. Класична електродинаміка – це фактично теорія електромагнітного поля Максвелла і електронна теорія Лоренца. Квантова електродинаміка – це квантова теорія електромагнітного поля і його взаємодії із зарядженими частинками. Електродинаміка рухомих середовищ вивчає особливості електромагнітних явищ (зокрема, процес поширення електромагнітних хвиль) у рухомих середовищах.

У курсі фізики середньої школи мова йде про основи електродинаміки.

Електродинаміка в шкільному курсі фізики

У шкільному курсі фізики можна умовно виділити дві групи питань, які відносяться до електродинаміки.

Перша група питань повинна ознайомити учнів з основними ідеями вчення Максвелла про електромагнітне поле. Зміст цього вчення виражають рівняння Максвелла.

Вивчення цих рівнянь у загальноосвітній школі в інтегральній і, тим більше, в диференціальній формі не можливо через складність математичного апарату, який потрібен для їх розуміння. Разом з тим стає можливим ознайомити учнів з основними ідеями вчення про електромагнітне поле, які містяться в рівняннях Максвелла:

$$\oint_L \vec{H} \, d\vec{l} = \int_S \vec{j} \, d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} \, d\vec{S} \quad (1)$$

$$\oint_L \vec{E} \, d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \, d\vec{S} \quad (2)$$

$$\oint_S \vec{D} \, d\vec{S} = \int_V \rho \, dV \quad (3)$$

$$\oint_S \vec{B} \, d\vec{S} = 0 \quad (4)$$

де \vec{H} і \vec{B} – відповідно напруженість і індукція магнітного поля, \vec{D} і \vec{E} – індукція і напруженість електричного поля, \vec{j} і ρ – густина струму і об'ємна густина заряду.

Зміст цих рівнянь:

Перше рівняння відображає той факт, що джерела магнітного поля – або рухомі заряди (електричні струми), або змінні електричні поля (струми зміщення).

Друге рівняння виражає закон електромагнітної індукції. Воно показує, що джерело вихрового електричного поля – змінне у часі магнітне поле.

Рівняння (3) і (4) являють собою теорему Гауса відповідно для електричного і магнітного полів. Ці рівняння відображають той факт, що лінії індукції

електричного поля розпочинаються і закінчуються на зарядах, а лінії індукції магнітного поля завжди замкнені.

Величини, що входять до рівнянь Максвелла не незалежні. Між ними існують співвідношення: $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, $\vec{j} = \gamma \vec{E}$, де ϵ, μ, γ – величини, що характеризують властивості середовища.

Для розгляду питань, які можуть бути вивчені в школі, достатньо користуватися тільки однією силовою характеристикою для кожного поля (\vec{E}, \vec{B}), а також характеристиками самих середовищ (ϵ, μ, ρ). Рівняння $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ являє собою закон Ома у диференціальній формі.

До основних рівнянь електродинаміки відноситься формула сили Лоренца $\vec{F} = q\{\vec{E} + [\vec{v}\vec{B}]\}$. Електричні і магнітні поля виявляються за їх дією на заряджені частинки. Знаючи напруженість електричного поля \vec{E} і індукцію магнітного поля \vec{B} , можна знайти силу, яка діє в цих полях на частинку із зарядом q , що рухається зі швидкістю \vec{v} . Знаючи силу, початкові умови і масу частинки, можна визначити характер її руху.

Другу групу питань електродинаміки складають закономірності електричного струму у різних середовищах. Їх доцільно розглядати на основі електронної теорії. Механізм електропровідності різних середовищ, а в особливості металів і напівпровідників, може бути правильно відображений на основі квантової теорії, в якій враховується квантовий характер змін енергії електронів і особливий характер розподілу їх по енергетичним рівням.

Класична електронна теорія являє собою перший ступінь на шляху пізнання мікросвіту. Вона є наочною і достатньо точною теорією для широкого кола електромагнітних явищ. Ця теорія дає цінні результати при розгляді поведінки заряджених частинок у рідинах і твердих тілах. Тому при вивченні в школі електричного струму в різних середовищах, достатньо користуватися елементами класичної електронної теорії, незважаючи на те, що в деяких питаннях (які фактично не розглядаються в школі) вона приводить до висновків, що суперечать дослідам.

Електромагнітне поле і речовина

Крім силової дії електромагнітного поля на заряди, за якою визначають його характеристики, електромагнітне поле має і ряд інших властивостей (володіє певним запасом енергії, має інертну і гравітаційну маси тощо). Одні з властивостей аналогічні властивостям речовини, інші характерні тільки для електромагнітного поля і дозволяють відрізнити його як від інших видів полів, так і від речових об'єктів.

Усі процеси, що відбуваються з участю електромагнітного поля, узгоджуються з такими основними законами: законом збереження імпульсу і законом збереження моменту імпульсу; законом збереження електричного заряду (специфічний закон характерний саме для електромагнітних взаємодій); законом взаємозв'язку маси і енергії. Це вказує на глибоку внутрішню єдність речових об'єктів і полів. Ці два види матерії мають ряд спільних рис:

1) речовина і поле – два види матерії, які реально існують незалежно від нашої свідомості;

2) речовина і поле мають енергію;

3) їм притаманні як хвильові так і корпускулярні властивості;

4) всі процеси, що відбуваються в полі, підлягають законам збереження;

5) речовина і поле проникливі одне для одного; поле змінює властивості речовини (поляризація, намагнічування), а речовина впливає на поле (цей вплив характеризується діелектричною і магнітною проникністю);

6) можливе взаємне перетворення речовини і поля (народження пари електрон-протон за рахунок фотона і зворотний процес – електрон і позитрон, об'єднуючись, утворюють два гама-кванти).

Але електромагнітне поле і речовина мають ряд властивостей, які дозволяють їх розрізняти:

1) речові об'єкти одні з одними безпосередньо не взаємодіють, взаємодія відбувається за схемою: частинка – поле – частинка. Сучасна теорія показує, а експеримент підтверджує, що при великих напруженостях можливі взаємодії між полями;

2) поля, на відміну від речовини, не мають певної просторової локалізації, точно вказати їх межі не можливо;

3) один і той самий об'єм простору не може бути зайнятим одночасно різними речовинними об'єктами; в одному і тому самому об'ємі можуть існувати декілька різних полів;

4) поле має значно меншу густину енергії і маси ніж речовина;

5) речовина має масу спокою, у фотонів (квантів електромагнітного поля) маса спокою дорівнює нулю;

6) частинки речовини можуть рухатися з будь-якою швидкістю, що не перебільшує швидкості світла у вакуумі, для електромагнітного поля, за відсутності сильних гравітаційних полів, існують лише дві швидкості: нульова – для статичних полів і швидкість світла – для вільного поля (електромагнітних хвиль);

7) поле, на відміну від речовини, не може бути системою відліку, тому що швидкість його величина стала відносно рухомих і нерухомих об'єктів.

Електромагнітне поле умовно поділяють на вільне і пов'язане. Пов'язане – це поле, яке нерозривно пов'язане з електричним зарядом, а вільне – поле нібито "відірване" від заряду і поширюється у просторі у вигляді електромагнітних хвиль.

Роль системи відліку в електродинаміці

Для опису електромагнітних явищ, як і механічних явищ, необхідно використовувати певну систему відліку.

Роль системи відліку в електродинаміці найбільш повно була з'ясована спеціальною теорією відносності, в якій встановлюються такі співвідношення між векторами \vec{E} і \vec{B} в двох інерціальних системах відліку, що рухаються одна відносно одної зі швидкістю \vec{v} вздовж осі X (координатні осі у цих інерціальних

системах відліку відповідно паралельні):

$$E'_x = E_x, B'_x = B_x$$

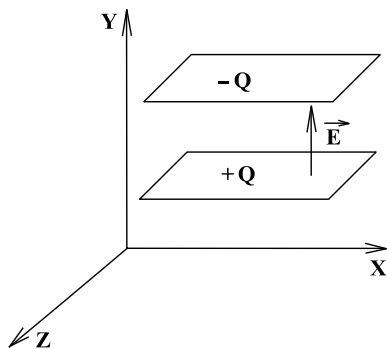
$$E'_y = \frac{E_y - vB_z}{\sqrt{1-\beta^2}}, B'_y = \frac{B_y + \frac{v}{c^2}E_z}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$E'_z = \frac{E_z - vB_y}{\sqrt{1-\beta^2}}, B'_z = \frac{B_z - \frac{v}{c^2}E_y}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

У цих формулах величини без штрихів відносяться до векторів електромагнітного поля в одній системі відліку (умовно нерухомої), а величини із штрихами – до іншої системи відліку, яка рухається зі швидкістю \vec{v} відносно першої у позитивному напрямі її осі X; через β позначено співвідношення $\frac{v}{c}$ (c – швидкість світла у вакуумі).

Ці формули перетворення полів указують, що електричні і магнітні поля взаємопов'язані. З них видно, що навіть у тому випадку, коли в одній системі відліку спостерігається тільки електричне або магнітне поле, у другій системі відліку спостерігатимуться і електричне і магнітне поля, тобто електромагнітне поле.

Електричне і магнітне поле являють собою часткові проявлення єдиного електромагнітного поля, які залежать від вибору системи відліку.



Наприклад.

У системі відліку K спостерігається однорідне електричне поле, напрямлене вздовж осі OY. Таке поле може бути створене плоским конденсатором. Тоді в цій системі відліку мають місце такі прості співвідношення:

$$E_x = E_z = 0, E = E_y, B_x = B_y = B_z = 0.$$

У рухомій системі відліку K' згідно формули перетворення полів отримуємо:

$$E'_x = E'_z = 0, E'_y = \frac{E_y}{\sqrt{1-\beta^2}}, B'_x = B'_y = 0, B'_z = \frac{-\frac{v}{c^2}E_y}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Таким чином, у рухомій системі відліку буде спостерігатися як електричне поле напруженістю E'_y , так і магнітне поле з індукцією B'_z . Іншими словами, в такій системі відліку виявляється електромагнітне поле.

Виявити наявність електричного і магнітного полів можна за допомогою індукторів, дія яких ґрунтується на особливостях кожного з цих полів.

Характерною особливістю електричного поля є його здатність діяти на нерухомі заряди. Тому індикатором електричного поля може бути невелике заряджене тіло, що підвішене на ізолюючій нитці.

Характерною особливістю магнітного поля є його здатність діяти тільки на рухомі заряди, причому ця дія залежить від модуля і напрямку швидкості руху. Електричне поле також діє на рухомі заряди, але ця дія не залежить від вектора швидкості \vec{v} . Тоді індикатором магнітного поля може бути легкорухома рамка зі струмом (або магнітна стрілка, в цьому випадку фактично використовуються мікроструми у речовині магніту).

ЕЛЕКТРОСТАТИКА

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД

Заряд – властивість. Заряд макроскопічних тіл. Заряд – фізична величина. Термін "заряд" у науковій та методичній літературі. Дискретність, інваріантність, збереження заряду.

1. У термінології теоретичної електротехніки так визначається зміст терміну "електричний заряд":

Електричний заряд – властивість частинок матерії або тіл, яка характеризує їх взаємозв'язок із власним електромагнітним полем – має два види, відомі як позитивний заряд (заряд протона, позитрона тощо) і негативний заряд (заряд електрона тощо), кількісно визначається за силовою взаємодією тіл, які мають електричні заряди.

Отже, терміном "електричний заряд" позначається властивість певних елементарних частинок: наявність у тіла (частинки) заряду (властивості) означає, що воно здатне до електромагнітної взаємодії і, водночас, є джерелом електромагнітного (електричного, магнітного) поля.

Якщо розглянути електрично заряджене тіло (частинку) й пов'язане з ним поле у різних системах відліку, то у випадку рівномірного руху цього тіла (частинки) можна знайти такі інерціальні системи відліку, в яких виявляється або електричне поле, або електричне і магнітне поля. У випадку нерівномірного руху зарядженого тіла (частинки) його поле завжди буде електромагнітним – одночасно існуватиме і діятиме електричне і магніт-

не поля.

Зазначена властивість заряджених тіл (частинок) має два прояви: в одному випадку ці тіла притягуються одне до одного, у другому – відштовхуються. Тому одні тіла домовилися називати позитивно зарядженими, інші – негативно зарядженими. Одноіменно заряджені тіла (частинки) відштовхуються, різнойменно заряджені – притягуються. Для того щоб з'ясувати як саме заряджене тіло, домовилися вважати позитивно зарядженою скляну паличку після натирання її шовком і негативно зарядженою ебонітову (або бурштинову) паличку після натирання її хутром. За характером взаємодії даного тіла з цими паличками можна виявити як заряджене тіло – позитивно чи негативно.

2. Наявність електрично заряджених макроскопічних тіл зумовлено існуванням у природі елементарних частинок, які мають невід'ємну від них властивість – електричний заряд.

Зараз відома досить велика кількість елементарних частинок, частина з яких має електричний заряд.

Як відомо, речовина складається з атомів, а атоми – з позитивно заряджених ядер, до складу яких входять елементарні частинки – позитивно заряджені протони і нейтральні нейтрони, та електронів, які обертаються по електронним орбітам навколо ядер.

Більшість відомих на сьогодні заряджених елементарних частинок нестабільні. Вони розпадаються на інші частинки, отже, мають кінцевий час життя, який становить, здебільшого, незначні долі секунди.

Стабільними зарядженими елементарними частинками, тобто такими, що мають нескінченний час життя, є лише електрони, протони та їхні античастинки.

Нейтрони у складі ядер мають необмежений час життя, а у вільному стані, поза ядрами, їх середній час життя триває близько 17хв.. Протягом цього часу нейтрон розпадається на протон, електрон і антинейтрино.

Якщо нейтральний атом хімічного елемента втрачає один або декілька електронів зовнішньої валентної електронної оболонки, то він перетворюється у позитивно заряджений іон. І, навпаки, якщо атом набуває надлишкових електронів, то він стає негативно зарядженим іоном.

Втратою або приєднанням електронів пояснюється набуття макроскопічними тілами зазначеної властивості, тобто електричного заряду.

Наприклад, обидва різнорідні тіла набувають електричні заряди під час їх тертя одне об одного. При щільному контакті двох різнорідних тіл їхні атоми в місцях дотиків наближаються настільки, що, взаємодіючи між собою, можуть захоплювати або віддавати частину електронів зовнішньої валентної оболонки. Тіла, атоми яких при контакті набули зайвих електронів, електризуються – стають електрично зарядженими негативно, а тіла, атоми яких віддають електрони, – електризуються позитивно.

Саме процесами зміни кількості електронів пояснюється набуття макроскопічними тілами властивості, яка має назву електричного заряду. Водночас, відсутність у макроскопічного тіла, атома, молекули такої властивості не означає відсутності в них частинок, які мають електричний заряд. При рівній кількості негативно і позитивно заряджених частинок в тілі, у ньому не виявляється зазначена властивість.

Виявити наявність у тіла електричного заряду можна за дією на заряджене тіло (частинку), розміщену біля даного тіла, певної сили. Дія на заряджене тіло або частинку збоку інших заряджених тіл за умови рівності в їх системі позитивних і негативних заряджених частинок, відсутня, адже дії заряджених тіл даної їх системи взаємно компенсуються.

3. Порівняти інтенсивність прояву властивості тіл, які електрично заряджені, можна, порівнюючи сили, з якими ці тіла діють на інше заряджене тіло. Виявляється, що інтенсивність прояву зазначеної властивості може бути різною, що вказує на необхідність введення фізичної величини – міри даної властивості. Такою фізичною величиною є "електричний заряд".

В СІ одиниця вимірювання електричного заряду є похідною і має назву "кулон" (Кл). Позначається ця фізична величина літерою q (кю). Якщо тіло заряджене позитивно, то символ заряду, що характеризує властивість даного тіла, записується зі знаком "плюс" (+ q). Якщо тіло заряджене негативно, то символ заряду, що характеризує властивість даного тіла, записується зі знаком "мінус" (- q).

Існують різні методи вимірювання заряду, в яких застосовуються різні види електромагнітної взаємодії: електростатичні методи (дослід Міллікена); електромагнітні методи (визначення питомого заряду електрона на основі сили Лоренца); визначення заряду, який пройшов по електричному колу; вимірювання заряду за допомогою явища електролізу тощо.

4. Термін "електричний заряд" або "заряд" у науковій літературі, підручниках використовується в трьох значеннях: властивість, фізична величина, заряджене тіло (частинка). Однакова назва властивості тіла або процесу і фізичної величини, що її (або його) характеризує, має місце у різних розділах фізики-науки. Так, термін "робота" вживається для позначення процесу перетворення енергії і, водночас, фізичної величини, що характеризує даний процес. Цей факт може привести до помилкового висновку про тотожність властивості і відповідної фізичної величини. На те, що мова йде про фізичну величину – електричний заряд, як правило, вказує сполучення назви величини і її числового значення, або вказівка на "значення заряду".

Вживання терміну "заряд" замість "заряджене тіло" (або частинка) робить виклад певного тексту лаконічним. Але, з точки зору формування даного поняття у свідомості тих, хто вперше з ним зустрічається, таке вживання терміну може привести до створення уявлення про електричний заряд як про щось предметне, речове, що можна штучно передавати від тіла до тіла. Так, під виразом "заряд передається від одного тіла до іншого", учні розуміють, що насправді якась субстанція переходить від тіла до тіла.

В одному з підручників є такий фрагмент тексту: "Діелектрики складаються з нейтральних атомів і мо-

лекул, позитивний заряд яких зосереджений у ядрах, а негативний – електронних шарах. Ці заряди розміщені в різних точках простору і внаслідок безперервного руху їхнє розміщення постійно змінюється".

Якщо у того, хто читає даний фрагмент тексту, сформоване правильне уявлення про електричний заряд, то для нього стає зрозумілим про що йде мова. У даному фрагменті замість вказівки на реальні заряджені частинки вживається абстрактне поняття "заряд", розуміючи під ним деяке фізичне тіло, всіма властивостями якого, крім "електричного заряду" нехтують.

Зрозуміло, що під час формування поняття "електричний заряд" необхідна конкретизація даного терміну, що не виключає у подальшому користування таким абстрактним поняттям. Але, перед цим учням треба пояснити, що розуміють під термінами "заряд", "пробний заряд", "елементарний заряд", "точковий заряд".

5. Електричні заряди електрона і протона майже рівні за абсолютним значенням і дорівнюють $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Цей заряд має назву елементарного і позначається літерою "e".

Носієм позитивного елементарного заряду є протон. За сучасними експериментальними даними позитивний заряд протона дорівнює за абсолютним значенням негативному заряду електрона з відносною точністю 10^{-21} .

На відміну від електрона протон має внутрішню структуру. Він складається з двох кварків із зарядами $+\frac{2|e|}{3}$ і одного з зарядом $-\frac{|e|}{3}$. Такий розподіл заряду всередині протона встановлено експериментально методом опромінювання протонів потоком швидких електронів (подібно дослідам Резерфорда з дослідження структури атомів).

Кварки перебувають у безперервному русі і їхнє місце знаходження від центра протона визначається сферою радіусом близько 10^{-15} м .

У вільному стані кварки не виявлені. На основі цього зроблено висновок, що дробних зарядів у вільному стані не існує. Це не означає, що дробних зарядів (кварків) не існує у зв'язаному стані всередині елементарних частинок.

Тому, розглядаючи значення електричних зарядів іонів, макроскопічних тіл вважається, що цей заряд завжди дорівнює цілому числу елементарних зарядів: $q = ne$. В цьому полягає "дискретність" заряду.

Дискретність заряду була доведена дослідями Міллікена, законами електролізу, дослідженнями елементарних частинок тощо.

Дискретність заряду (як і маса спокою) є проявом однієї з особливостей мікросвіту.

6. Електричний заряд абсолютний, тобто він не залежить від швидкості руху зарядженої частинки, отже і від системи відліку.

Так, неіонізовані атом і молекула нейтральні. Сумарні заряди електронної оболонки атома і його ядра у точності дорівнюють одне одному. В той же час характер руху електронів та ядер атомів суттєво відрізняються. Крім того, при хімічних перетвореннях рух електронів у оболонках атомів змінюється, що приводить до зміни характеру оптичних спектрів. Якби заряд хоча б у малому ступені залежав від швидкості руху частинок, то в хімічних реакціях могли б з'явитися не скомпенсовані заряди, що можна було б виявити.

Так, встановлено з величезною точністю (порядку $10^{-20} \cdot e$ на атом), що молекула водню електрично нейтральна так само як і атом гелію. У той же час за однакової кількості протонів і електронів в молекулі водню і атомі гелію рух електронів в них суттєво відрізняється.

Відомо, що при зміні температури металів у них не з'являється не скомпенсований заряд. Але швидкості електронів і іонів кристалічної решітки різні і при нагріванні змінюються по-різному.

Усе це свідчить про *інваріантність* заряду, тобто незалежності від швидкості руху зарядженої частинки (тіла), отже, і від системи відліку.

7. Для електричних зарядів справджується *закон їх збереження*.

У понятті "збереження заряду" містяться дві групи різних фактів.

Електрон і протон є матеріальними частинками з нескінченним часом життя, а їх елементарні заряди інваріантні і не залежать від швидкості. Отже, їх заряди існують без зміни настільки довго, наскільки довго існують протони і електрони, тобто при будь-яких рухах заряд зберігається. У такому розумінні закон збереження заряду є просто наслідком незнищенності носіїв заряду як фізичних об'єктів й інваріантності заряду.

Крім протонів і електронів існує велике число інших заряджених елементарних частинок. Всі вони народжуються, народжують інші частинки й зникають у різних процесах взаємоперетворень. Величезний експериментальний матеріал свідчить, що яким би не був процес взаємоперетворень частинок, алгебраїчна сума зарядів частинок до взаємоперетворення дорівнює алгебраїчній сумі зарядів після взаємоперетворень. Наприклад, при β -розпаді до випромінювання електрона ядро має певний позитивний заряд $+q$. Після випромінювання електрона позитивний заряд ядра збільшується на один позитивний елементарний заряд $(+q+e)$. Водночас, у сумі з негативним зарядом електрона $(-e)$, що випромінюється, система ядро+електрон має попередній заряд $(+q)$.

Іншим прикладом є народження пари електрон+протон. Вихідна частинка γ -квант нейтральна. Вона перетворюється на пару частинок, алгебраїчна сума зарядів яких дорівнює нулю $(+e-e=0)$.

Отже, закон збереження заряду можна сформулювати так: алгебраїчна сума електричних зарядів будь-якої замкненої (електрично ізольованої) системи залишається незмінною, які б процеси не відбувалися всередині цієї системи.

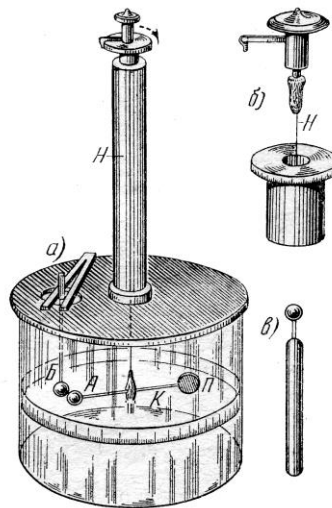
ЗАКОН КУЛОНА

Експериментальне відкриття закону Кулона. Умови і межі його застосування.

1. Закон Кулона – один з основних законів електростатики, який визначає силу взаємодії електрично заряджених тіл.

Про існування двох видів електрики і характер взаємодії однойменних та різнойменних електричних зарядів було відомо з 1759р. на основі праць Р.Сіммера і Ф. Епіноса. Перші експериментальні дослідження сили взаємодії між двома нерухомими точковими зарядами виконали незалежно один від одного англійський фізик Г.Кавендіш у 1772р., результати якого були опубліковані лише в 1879р., і французький фізик Ш.Кулон у 1785р.

Взаємодію заряджених тіл Кулон вивчав за допомогою сконструйованих ним крутильних терезів. Схема приладу зображена на малюнку.



(а – загальний вигляд приладу, б – його головка,
в – провідник для заряджання кульок А і Б)

На тонкій металевій нитці Н підвішене легке ізолююче коромисло К, яке має на одному з кінців кульку А, а на другому – протизагу П. Верхній кінець нитки закріплено на головці приладу, що може обертатися, яка дозволяє точно відрахувати кут закручування нитки. Всередину приладу можна вносити другу ізольовану кульку Б, точно такого ж розміру як і кулька А. Великий скляний циліндр захищає чутливі частини приладу від руху повітря.

Для того щоб встановити, як залежить взаємодія від відстані між кульками, їм надаються довільні заряди, торкаючись до них третьою зарядженою кулькою, закріпленою на ізолюючій ручці. Кульки відштовхуються і встановлюються на певній відстані, яку вимірюють користуючись шкалою приладу. Потім обертають головку приладу й закручують нитку підвісу, помічаючи при цьому відстані, до яких наближаються кульки при різних кутах закручування нитки. Кут закручування пропорційний моменту обертаючої сили. Знаючи, у скільки разів ми збільшили кут закручування нитки, ми тим самим визначаємо у скільки разів збільшився момент сили, а звідси і сама сила. Заряди кульок не змінюються. Порівнюючи зміни значення сили і, відповідно, зміни відстані між кульками, було встановлено, що сила обернено пропорційна квадрату відстані між зарядженими кульками.

Дослідне обґрунтування залежності сили взаємодії між зарядженими тілами від їх зарядів є складним оскільки величина заряду визначалася із закону Кулона, який треба було встановити.

Щоб розв'язати цю задачу, можна припустити, що при дотиканні зарядженої провідної кульки і точно такою за розмірами незарядженою кулькою, заряди розподіляються між ними порівну. Якщо виконати експеримент з нерухомою незарядженою кулькою, яка відштовхує вільно підвішену кульку з деяким фіксованим зарядом, а потім повторити експеримент з нерухомою зарядженою кулькою, заряд якої в два рази менший, то сили відштовхування знаходяться у співвідношенні 2:1.

Така ідея була реалізована у другій групі дослідів з крутильними терезами. Висновок: сила взаємодії кульки пропорційна зарядам обох кульок.

На основі експериментів був сформульований закон, який отримав назву закону Кулона: два нерухомих точкових заряджених тіла взаємодіють один з одним у вакуумі з силою \vec{F} , величина якої пропорційна добутку

зарядів q_1 і q_2 й обернено пропорційна квадрату відстані r між ними: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, де q_1 і q_2 – модулі заря-

дів, коефіцієнт пропорційності k залежить від вибору системи одиниць вимірювання (в СІ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, де ϵ_0 – електрична стала).

У векторній формі закон Кулона записується так: $\vec{F}_{2,1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{2,1}^2} \cdot \vec{r}_{2,1}$, де $\vec{r}_{2,1}$ – радіус вектор, на-

прявлений від q_2 до q_1 .

Оскільки $\vec{r}_{1,2} = -\vec{r}_{2,1}$, то $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$.

Сила F напрямлена вздовж прямої, що з'єднує точкові заряди, які взаємодіють між собою.

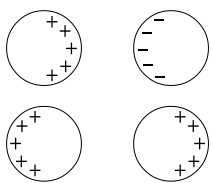
Якщо нерухомі точкові заряджені тіла перебувають в однорідному діелектрику з діелектричною проникністю ϵ , то сила взаємодії зменшується в ϵ разів: $F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$.

2. У формулюванні закону Кулона вказано на *нерухомість* тіл, що взаємодіють. Справа в тому, що взаємодія здійснюється за допомогою електромагнітного поля, яке поширюється у просторі з кінцевою швидкістю (швидкість світла). Час в закон Кулона не входить, а входить тільки відстань. Будь-яке зміщення одного із взаємодіючих електрично заряджених тіл відчує інше тіло не відразу, а через деякий час, потрібний електромагнітному сигналу для того, щоб пролетіти відстань, що розділяє заряджені тіла. Тому взаємодія між зарядженими тілами не може визначатися миттєвою відстанню між ними. Якби швидкість електромагнітного сигналу була нескінченно великою, то закон Кулона справджувався як для нерухомих, так і рухомих заряджених тіл. А в такому випадку поняття електромагнітного поля стало б непотрібним і його не можна було б виявити. Оскільки електромагнітний сигнал поширюється з великою, але кінцевою швидкістю, рухомі заряджені тіла взаємодіють не так, як нерухомі і описати цю взаємодію не можна без розгляду електромагнітного поля.

3. У формулюванні закону Кулона є також вказівка на *точковість* заряджених тіл. Справа в тому, що тільки у випадку точкових заряджених тіл можна не враховувати розподіл зарядів у просторі. У шкільних підручниках з фізики часто вказується на те, що закон Кулона у формі $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ застосовується: для точко-

вих тіл; для двох тіл, що мають форму кулі; для випадку, коли одне тіло можна розглядати як точкове заряджене тіло, а друге має форму великої кулі.

У такому випадку стає зрозумілим якою є відстань між взаємодіючими зарядженими тілами: відстань між точковими тілами; відстань між центрами куль; відстань між центром великої кулі і точковим тілом.



Але до заряджених куль, відстань між якими не можна вважати великою порівняно з їх радіусами, закон Кулона безпосередньо не застосовується: сила взаємодії різноманітних заряджених куль буде більшою, ніж однойменно зарядженими. Це видно з малюнку. Перерозподіл зарядів був би не суттєвим, якби розміри куль були малі порівняно з відстанню між ними.

Щоб визначити сили взаємодії між зарядженими тілами тоді, коли їх не можна вважати точковими, необхідно подумки поділити тіла на елементи, які можна вважати точковими зарядами. Сила взаємодії між зарядженими тілами буде виражатися векторною сумою сил, прикладених до всіх точкових зарядів другого тіла з боку кожного точкового заряду першого тіла. Треба враховувати, що взаємодія протяжних заряджених тіл при однакових умовах залежатиме від того чи є тіла провідниками, чи діелектриками.

4. Межі застосування закону Кулона.

Справедливість закону Кулона перевірено з великою точністю для відстаней від кількох міліметрів до десятків сантиметрів, доведена на основі методу Кулона. Для географічних і космічних відстаней перевірка закону Кулона ґрунтується на основі методів, пов'язаних із квантово-механічними уявленнями про взаємодію частинок з урахуванням їхніх хвильових властивостей. За допомогою супутників у просторі біля Землі вдалося перевірити закон Кулона з дуже великою точністю до відстаней 10^7 м.

Для малих відстаней закон Кулона перевірявся по взаємодії елементарних частинок. Досліди Резерфорда переконали у справедливості закону Кулона до ядерних масштабів порядку 10^{-17} м.

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНЕ ПОЛЕ

Далекодія і близькодія. Електричне поле. Напруженість – силова характеристика поля. Потенціал – енергетична характеристика поля.

1. У процесі вивчення взаємодії електрично заряджених тіл виникає питання: Як передається дія одного з таких тіл на інше?

Для відповіді на аналогічні питання розвивалися дві різні за своїм змістом *концепції*: *дальнодії* і *близькодії*. Згідно з першою концепцією дія від одного зарядженого тіла до іншого передається миттєво, без участі будь-якого матеріального носія цієї взаємодії, і при наявності тільки одного зарядженого тіла ніяких змін у

навколишньому просторі не відбувається. Згідно концепції близькодії взаємодія між нерухомими зарядженими тілами передається через електричне поле, яке оточує ці тіла, з кінцевою швидкістю від одних точок поля до інших. Концепція дальності не відповідала дійсності і була відкинута після відкриття й дослідження електромагнітного поля.

2. Помилково під полем розуміти сам простір, в якому діють певні сили. Простір, як і час, є формою існування матерії. З того, що поле існує у просторі, зовсім не випливає, що поле є простором, в якому діють сили, бо форму існування матерії не можна змішувати із самою матерією. Електричне поле є видом матерії, що здійснює взаємодію між зарядженими тілами (частинками речовини). Отже, навколо кожного зарядженого тіла існує власне електричне поле. Якщо в це поле помістити інше заряджене тіло, то на нього з боку поля діятиме сила.

Електричне поле створене нерухомими зарядженими тілами (частинками) називається електростатичним.

При вивченні електростатичних явищ обидві концепції (дальності і близькодії) приводять до однакових результатів: побудовані на їх основі теорії однаково добре погоджуються з експериментальними даними. Так, Кулон під час відкриття закону, названого на його честь, виходив з концепції дальності.

В електростатиці поняття поля іноді розглядають (сприймають) як поняття чисто умовне, яке вводять для зручності опису електричних явищ. Однак, при вивченні змінного електромагнітного поля, особливо електромагнітних хвиль, переконуються, що поле може існувати без заряджених тіл (частинок) (електромагнітні хвилі) і, що поняття поля має глибокий фізичний зміст – електромагнітне поле є об'єктивною реальністю. Якщо в просторі виявляється дія сил на електричні заряджені тіла, то це означає, що в ньому існує електричне поле. Поле реально так само як і речовина, і як речовина є одним із видів матерії.

До відома.

До праць Фарадея закон Кулона розглядався з точки зору дальності. У першій половині XIX ст. виробляється інша точка зору – теорія близькодії. Вона була введена М.Фарадеєм (1791 – 1861). Разом з ідеєю близькодії в науку увійшло уявлення про поле як посередника, через який здійснюється взаємодія. Спочатку функція посередника приписувалася деякому середовищу, яке заповнювало весь простір. Це середовище отримало назву Світового ефіру. Стан ефіру характеризувався певними механічними властивостями: пружністю, натягом, рухом одних частин середовища відносно інших тощо. З цієї точки зору сила, що діє на тіло, є наслідком взаємодії з середовищем у тій точці, в якій міститься тіло. Таким чином, механічна взаємодія формується у вигляді локальних співвідношень.

Спроба математичного формулювання цієї механічної картини передачі взаємодій у вигляді механічних сил була здійснена у 1861 – 1862 рр. Максвелом, який намагався розглядати сили електромагнітної взаємодії у вигляді механічних сил, зумовлених натягами і тисками в ефірі. Потім він перейшов до феноменологічного формулювання взаємодії, характеризуючи стан середовища за допомогою векторів індукції, напруженості електричного і магнітного полів \vec{E} , \vec{D} , \vec{H} , \vec{B} , яким не давалося будь-якої механічної інтерпретації. При цьому слід відмітити, що Максвел не виключав можливості механічного тлумачення феноменологічних рівнянь. У 1864р. він сформулював рівняння електромагнітного поля – рівняння Максвела. У подальшому з'ясувалося, що не можна приписувати ефіру механічних властивостей і не можна говорити про рух відносно ефіру. Надія на механічне тлумачення електромагнітних взаємодій не виправдовувалася. Але ідея локальних взаємодій і необхідність існування у просторі поля збереглися. Поле стає початковим ступенем й характеризується величинами, які не можуть бути ідентифіковані у рамках механічних уявлень. Це твердження у найбільш чіткій формі було висловлено у 1885р. Герцем (1857 – 1864), який експериментально відкрив електромагнітні хвилі і сформулював рівняння Максвела для вакууму в сучасному вигляді.

3. Для того щоб виявити наявність електричного поля в даній точці простору, в цю точку треба помістити електрично заряджене тіло. Про наявність поля свідчить дія на заряджене тіло певної сили. Дія поля на заряджені тіла є основною характеристикою електромагнітного поля.

Для дослідження електричного поля у різних його точках треба поміщати електрично заряджене тіло. Це заряджене тіло не повинно викривляти досліджуване поле, тобто воно повинно бути достатньо малим і не викликати перерозподіл зарядів, які створюють поле. Таке заряджене тіло називають *пробним зарядом*.

Якщо в конкретну точку електричного поля поміщати пробні заряди, які мають різні числові значення, то на них будуть діяти з боку поля різні сили. Але, якщо знайти відношення кожної з цих сил до величини пробного заряду, на який ця сила діє, то отримаємо одне й те саме числове значення. Це означає, що відношення

$\frac{\vec{F}}{q_0}$ характеризує електричне поле, адже воно не залежить від внесеного у дану точку поля пробного заряду,

має одне й те саме значення для конкретної точки даного поля, у різних точках поля може мати різні значення. Фізичну величину, яка визначається даним відношенням називають *напруженістю* електричного поля.

Напруженість електричного поля – векторна величина, яка є основною кількісною характеристикою електричного поля; визначається відношенням сили, що діє з боку поля на пробний заряд, до величини заряду.

Позначається літерою \vec{E} . Вимірюється в СІ у $\frac{В}{м}$.

Напруженість є силовою характеристикою електричного поля, адже вона характеризує властивість поля

діяти на внесені в нього заряджені тіла з певною силою.

Напруженість – векторна величина. Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, з якою поле діє на позитивний пробний заряд, розміщений у даній точці поля.

Якщо поле створене нерухомим точковим зарядом Q_0 , то на пробний заряд q буде діяти сила $F = k \frac{Q_0 q}{r^2}$. Тому значення напруженості електростатичного поля, створеного нерухомим точковим зарядом,

обчислюється за формулою: $E = k \frac{Q_0}{r^2}$.

Для того щоб знайти напруженість електростатичного поля, створеного системою нерухомих точкових заряджених тіл, виходять з *принципу суперпозиції*, згідно якого повна напруженість поля в точці дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених у даній точці окремими точковими зарядженими тілами:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Електростатичне поле можна, в принципі, зображувати, проводячи в кожній його точці вектори напруженості. Але, графічне зображення електростатичного поля за допомогою векторів напруженості \vec{E} у різних точках поля дуже незручно. Вектори напруженості при цьому накладатимуться один на одного і отримуватиметься заплутана картина. Більш наочний, запропонований М.Фарадеєм, метод зображення електростатичних полів за допомогою силових ліній (ліній напруженості).

Силовими лініями називають криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості.

Силовим лініям приписується напрям, який збігається з напрямком вектора напруженості.

Вважається, що силові лінії розпочинаються на позитивно заряджених тілах і закінчуються на негативно заряджених. Лінії напруженості не перетинаються, адже у кожній точці поля вектор \vec{E} має лише один напрям. Густина силових ліній, як правило, вибирається такою, щоб число силових ліній, які проходять через одиничну площадку, перпендикулярну до цих ліній, було пропорційне напруженості поля на цій площадці. Отже, силові лінії дають наочну картину розподілу поля у просторі: густина силових ліній і їх напрям характеризують величину і напрям вектора напруженості поля.

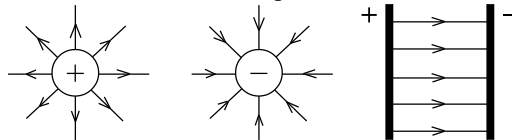
Силові лінії електростатичного поля завжди не замкнені.

Електростатичне поле, в якому напрям і значення напруженості у всіх точках однакові, має назву *однорідного*.

В однорідному полі силові лінії паралельні одні одним, а їх густина однакова, мають однаковий напрям.

На основі закону Кулона і принципу суперпозиції полів можна визначати напруженість поля практично будь-якої сукупності заряджених тіл. Але такий спосіб розв'язування задач електростатики часто приводить до надто громіздких обчислень. Задача набагато спрощується, якщо скористатися деякими теоремами про загальні властивості електростатичного поля. Однією з таких теорем є теорема Остроградського-Гауса.

На малюнках зображені силові лінії деяких електростатичних полів:



4. На заряджене тіло, яке знаходиться в електричному полі, з боку поля діє сила. Під дією цієї сили тіло може переміщуватися, тобто поле здатне виконувати роботу. Це означає, що поле має енергію.

Джерелом електростатичного поля є заряджене тіло (частинка). Цим можна пояснити наступне. Лінії напруженості цього поля не замкнені, а розпочинаються і закінчуються на заряджених тілах. При переміщенні зарядженого тіла між двома точками будь-якою траєкторією у прямому і зворотному напрямках буде виконуватися електростатичними силами робота рівна за абсолютним значенням, але протилежна за знаком. Ця робота не залежить від форми траєкторії і на замкненому шляху дорівнює нулю.

Останнє можна пояснити так: якби поле не було пов'язане з джерелом (зарядженим тілом), то можна було б вибрати такий шлях переміщення пробного електричного заряду, на якому робота не змінювала б знаку. У такому випадку форма траєкторії відігравала б істотну роль.

Поле, в якому робота з переміщення тіла не залежить від форми траєкторії, а визначається тільки початковим і кінцевим положенням тіла, має назву *потенціального*. Електростатичне поле *потенціальне*.

Заряджене тіло, перебуваючи в електростатичному полі, має потенціальну енергію W .

Роботу сил електростатичного поля можна розглядати як зменшення потенціальної енергії зарядженого тіла, адже воно є потенціальним.

Якщо позначити потенціальну енергію зарядженого тіла, що переміщується під дією електростатичних сил, у початковій і кінцевій точках траєкторії відповідно через W_1 і W_2 , то робота сил електростатичного поля дорівнює $A = W_1 - W_2$.

Різні пробні заряди $q_1, q_2, q_3 \dots$ у даній точці поля матимуть різні потенціальні енергії. Водночас, відношення потенціальної енергії пробних зарядів до їх значень для даної точки поля є величина стала.

Ця величина, яка дорівнює відношенню потенціальної енергії пробного заряду, що знаходиться у даній точці електростатичного поля, до значення заряду називається *потенціалом*. Позначається потенціал літерою φ (фі), в СІ вимірюється в вольтах $\left(1\text{В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}\right)$.

Фізична величина – потенціал не залежить від величини пробного заряду і тому вона характеризує електростатичне поле у даній його точці.

Якщо позначити потенціали точок, в яких перебував пробний заряд до і після виконання роботи силами електростатичного поля з його переміщення, відповідно φ_1 і φ_2 та, враховуючи, що $\varphi = \frac{W}{q}$, або

$W = \varphi q$, можна записати:

$$A = W_1 - W_2 \text{ або } A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Фізична величина $(\varphi_1 - \varphi_2)$ має назву різниці потенціалів і чисельно дорівнює відношенню роботи з переміщення пробного заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду.

Значення потенціальної енергії залежить від вибору початку її відліку (вибору нульового рівня потенціальної енергії). Отже, значення потенціалу залежить від вибору точки, в якій потенціал дорівнює нулю. Такою точкою у фізиці вважають точку, що знаходиться у нескінченності.

Тому, *потенціал* даної точки електростатичного поля можна визначити, як фізичну величину, чисельно рівну роботі, що виконується електростатичними силами при переміщенні одиничного позитивного пробного заряду із даної точки поля у нескінченність.

Очевидно, що ця робота чисельно дорівнює роботі, яка виконується зовнішніми силами (проти сил електростатичного поля) при перенесенні одиничного позитивного пробного заряду з нескінченності в дану точку поля.

Зазначимо, що поняття "нескінченність", де прийнято вважати $\varphi = 0$, фізично не визначено. Тому при знаходженні потенціалу в довільній точці поля завжди допускають неточність на величину потенціалу в точці, яку приймають розміщеною на "нескінченності". Іншими словами, потенціал довільної точки поля визначають завжди з точністю до адитивної сталої. Тому поняття потенціалу в цьому розумінні дещо фізично не визначено. Більш строгим і однозначним поняттям є *різниця потенціалів* як фізична величина, що визначається роботою при переміщенні пробного заряду $q_0 = 1\text{Кл}$ між точками поля з потенціалами φ_1 і φ_2 .

На практиці часто буває зручнішим вважати рівним нулю потенціал Землі. Це допустимо, тому що при будь-яких розрахунках важливо знати різницю потенціалів між деякими точками електростатичного поля, а не абсолютне значення потенціалів у цих точках.

Різницю потенціалів в електричному полі називають напругою і позначають літерою U . Напругу, як і потенціал, в СІ вимірюють у вольтах.

Графічно зобразити електростатичне поле можна за допомогою екіпотенціальних поверхонь – поверхонь, в кожній точці яких потенціали однакові.

Силкові лінії перпендикулярні до екіпотенціальних поверхонь.

Умовилися проводити поверхні таким чином, щоб різниця потенціалів для двох сусідніх поверхонь була всюди одна й та сама. Тоді за густиною екіпотенціальних поверхонь можна зробити висновок про величину напруженості поля: чим густіше розміщені ці поверхні, тим швидше змінюється потенціал при переміщенні вздовж нормалі до поверхонь і тим більша у цьому місці напруженість \vec{E} , адже $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$ (для однорідно-

го поля $E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$).

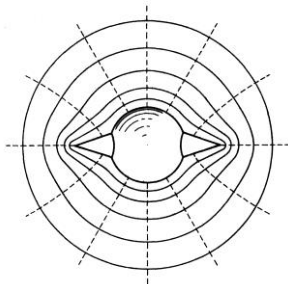
ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ

Розподіл електричних зарядів на провіднику. Електростатична індукція.

1. *Провідником* називають тіло, в якому електричні заряди можуть вільно переміщуватися по всьому його об'єму.

Провідниками є всі метали, розчини солей, кислот, лугів, розплавлені солі, розжарені гази тощо.

Дослід показує, що при наданні провіднику додаткових зарядів, вони розподіляються по його поверхні. При рівновазі зарядів надлишкових зарядів всередині провідника немає. Тому видалення речовини з деякого об'єму, взятого всередині провідника, ніяк не відіб'ється на рівноважному розміщенні зарядів. Таким чином, наданий надлишковий заряд розподіляється на провіднику, в якому є порожнини, так само, як і на суцільному провіднику – на його зовнішній поверхні. На поверхні порожнини у стані рівноваги надлишкові заряди розміщуватися не можуть. Цей висновок випливає з того, що однойменні елементарні заряди, що утворюють даний заряд, взаємно відштовхуються і, отже, намагаються розміститися на найбільшій відстані одні від одних.



На великих відстанях від зарядженого провідника еквіпотенціальні поверхні мають характерну для точкового заряду форму сфери. При наближенні до провідника еквіпотенціальні поверхні стають все більш схожими з поверхнею провідника, яка є еквіпотенціальною. Поблизу виступів еквіпотенціальні поверхні розміщуються густіше, отже і напруженість поля тут більша. Звідси випливає, що густина зарядів на виступах особливо велика.

Поблизу поглиблень у провіднику еквіпотенціальні поверхні розміщені рідше. Відповідно напруженість поля і густина зарядів у цих місцях менша. Взагалі, густина зарядів при даному потенціалі провідника визначається кривизною поверхні – вона зростає зі збільшенням позитивної кривизни (опуклості) і зменшується зі збільшенням негативної кривизни (угнутості). Особливо великою буває густина зарядів на вістрях.

При рівновазі зарядів електричне поле в кожній точці всередині провідника відсутнє. Поза провідником силові лінії електричного поля у даному випадку напрямлені перпендикулярно до його поверхні.

До відома.

Велика величина напруженості поля поблизу вістря на зарядженому провіднику приводить до явища, відомого під назвою "електричний вітер".

В атмосферному повітрі завжди є невелике число позитивних іонів і вільних електронів, які виникають під впливом космічних променів, випромінювання радіоактивних речовин тощо. У сильному електричному полі біля вістря позитивні іони рухаються й захоплюють за собою молекули повітря, утворюючи "електричний вітер". Якщо біля вістря розмістити полум'я свічки, то воно під дією вітру буде відхилятися.

2. При внесенні незарядженого провідника в електричне поле носії заряду приходять в рух – позитивні рухаються в напрямі вектора напруженості \vec{E} , негативні – у протилежний бік. В результаті на кінцях провідника з'являються заряди протилежних знаків, що мають назву "індукованих зарядів".

Поле цих зарядів всередині провідника напрямлене протилежно полю, в яке помістили провідник. Ці два поля всередині провідника накладаються одне на одне, що призводить до послаблення результуючого поля. Перерозподіл но-

сіїв зарядів відбувається доти, доки напруженість результуючого поля всередині провідника не стане рівною нулю, а лінії напруженості поза провідником – перпендикулярними до його поверхні. Якщо всередині провідника є порожнина, то в ній поле також відсутнє. На цьому ґрунтується електростатичний захист.

Якщо провідник, який перебуває в електричному полі, розділити на дві частини у напрямі перпендикулярному вектору \vec{E} , роз'єднати їх, а потім винести з поля, то кожна частина матиме заряд одного знаку.

ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ

Полярні і неполярні молекули. Поляризація діелектриків. Поле всередині діелектрика.

1. Диполь являє собою сукупність двох однакових за абсолютною величиною і протилежних за знаком точкових зарядів $+q$ і $-q$, розміщених на деякій відстані l . Якщо відстань між зарядами не змінюється, то такий диполь називається жорстким.

Згідно уявлень класичної фізики *діелектрики* відрізняються від провідників тим, що за відсутності дуже сильних електричних полів в них немає вільних електричних зарядів.

Кожна молекула діелектрика містить позитивно заряджені ядра і електрони, що рухаються навколо ядер. Позитивний заряд всіх ядер молекули дорівнює абсолютній величині заряду всіх електронів, так що молекули речовини в цілому нейтральні. Але це не означає, що молекули речовини не мають електричних властивостей.

Замінивши всі позитивні заряди ядер молекули одним сумарним зарядом $+q$, який знаходиться у "центрі тяжіння" позитивних зарядів, а всі негативні заряди – одним сумарним негативним зарядом $-q$, розміщеним у "центрі тяжіння" негативних зарядів, можна у першому наближенні розглядати молекулу діелектрика як диполь, що складається з зарядів $+q$ і $-q$.

У молекул деяких діелектриків електрони розміщені симетрично навколо ядер. У цих молекул "центри тяжіння" позитивних і негативних зарядів за відсутності зовнішнього електричного поля збігаються. Молекули таких діелектриків називають *неполярними*.

Велику групу діелектриків складають речовини, у молекулах яких електрони розміщені не симетрично відносно ядер. У таких молекул "центри тяжіння" позитивних і негативних зарядів не збігаються. Молекули такого типу називаються *полярними*.

2. Усі електричні заряди діелектрика зв'язані з атомами і молекулами речовини. Під дією поля ці заряди, що мають назву *зв'язаних* зарядів, можуть зміщуватися тільки у межах мікроскопічних об'єктів.

Процес зміщення зв'язаних зарядів під дією зовнішнього електричного поля називається *поляризацією* діелектрика. В результаті поляризації на поверхні діелектрика з'являються *поляризаційні* заряди.

Якщо діелектрик з полярними молекулами не перебуває у зовнішньому електричному полі, то внаслідок безладного теплового руху молекул, які вважатимемо диполями, спостерігається хаотичне розміщення цих диполів. При внесенні такого діелектрика у зовнішнє електричне поле на кожний диполь з боку поля діятиме пара сил, яка прагне розташувати диполі вздовж його силових ліній. Цьому перешкоджає тепловий рух молекул. В результаті спільної дії обох причин у діелектрика виникає часткова орієнтація диполів уздовж поля. Дана орієнтація буде більш повною, чим сильніше електричне поле у діелектрику і чим слабше тепловий рух молекул, тобто чим нижче температура. Описаний процес має назву *орієнтаційної поляризації* діелектрика з полярними молекулами.

Якщо у зовнішнє електричне поле помістити діелектрик з неполярними молекулами, то відбувається деформація електронних орбіт і молекулу можна уявити у вигляді пружного диполя. "Центри тяжіння" позитивних і негативних зарядів неполярних молекул тим більше віддаляються одні від одних, чим сильніше зовнішнє поле. При зменшенні напруженості цього поля дана відстань скорочується. Тепловий рух не впливає на зміщення "центрів тяжіння" позитивних і негативних зарядів у неполярних молекулах під дією електричного поля. Істотним є те, що в утворених диполях зміщення "центрів тяжіння" зарядів відбувається вздовж силових ліній поля. Описана поляризація діелектрика має назву *електронної*.

У кристалічних діелектриків, які мають кубічні іонні кристалічні решітки (наприклад, NaCl) під дією електричного поля, в якому міститься діелектрик, всі позитивні іони зміщуються в напрямі напруженості \vec{E} , а всі негативні іони зміщуються у протилежному напрямі. При цьому всередині кристалу в кожній одиниці об'єму міститься однакове число позитивних і негативних іонів, а на кожній з двох протилежних граней обмеженого кристалу, перпендикулярних до вектора напруженості поля, знаходяться іони одного знаку. Такий вид поляризації має назву *іонної*.

Той факт, що в діелектриках немає вільних зарядів, а під впливом поля зв'язані заряди можуть зміщуватися в межах молекул, пояснює неможливість розділу зарядів, що утворюються на поверхні діелектрика при внесенні його в електричне поле.

В електричному полі заряди знаходяться на поверхні діелектрика. При наближенні до стержня з діелектрика зарядженого тіла, що створює вказане поле, на ближчій до тіла поверхні діелектрика виникає заряд протилежного знаку, а на віддаленій – того самого знаку, що й у зарядженого тіла. Розламавши стержень з діелектрика, дістанемо два шматки, кожен з яких матиме на своїх кінцях заряди протилежних знаків. Якщо тепер окремі частини стержня винести за межі поля, то вони залишаться незарядженими.

3. При внесенні в електричне поле однорідного діелектрика він стає поляризованим. Якщо всередині поляризованого діелектрика виділити деякий об'єм ΔV , то він залишається електрично нейтральним. Це пояснюється тим, що в скінченному об'ємі міститься досить велика кількість дипольних молекул і близько розміщені заряди протилежних знаків взаємно врівноважуються. Інша кар-

тина буде в тонких шарах біля поверхні поляризованого діелектрика. Незалежно від типу поляризації на тій поверхні, в яку входять лінії напруженості зовнішнього електричного поля, створюється більша концентрація негативно заряджених частинок (негативно заряджених кінців молекулярних диполів), а на протилежній поверхні, з якої виходять лінії напруженості, – збільшується концентрація позитивно заряджених частинок.

Поляризаційні заряди створюють всередині діелектрика власне електричне поле, яке спрямоване проти зовнішнього електричного поля. Поле в діелектрику послаблюється.

ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ

Наданий провіднику електричний заряд розподіляється по його поверхні так, що поверхня провідника стає екіпотенціальною. Зміна заряду провідника приводить до зміни його потенціалу. Різні за формою і розмірами відокремлені провідники при однаковому заряді набувають неоднакові потенціали. Водночас, для кожного конкретного відокремленого провідника, що перебуває у конкретному середовищі, відношення його заряду до потенціалу цього провідника є величина стала $C = \frac{q}{\varphi}$. Величина C має назву електроємності. Записана, визначальна для електроємності відокремленого провідника, формула справедлива за умови відсутності стікання заряду з провідника у навколишнє середовище.

Електроємність відокремленого провідника не залежить від матеріалу провідника, його агрегатного стану, форми і розміру можливих порожнин в його середині. Це пов'язано з тим, що надлишкові заряди розміщуються тільки на зовнішній поверхні провідника. Водночас, електроємність не залежить не від заряду провідника, не від його потенціалу. Це зовсім не суперечить вказаній визначальній формулі. Електроємність відокремленого провідника прямо пропорційна діелектричній проникності середовища. Вона залежить від форми і розмірів провідника. Так електроємність відокремленої кулі радіусом R , яка перебуває в однорідному середовищі з діелектричною проникністю ε дорівнює $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$.

Електрична ємність – характеристика провідника, кількісна міра його здатності утримувати електричні заряди.

За одиницю електроємності в СІ прийнято фарад (Ф) – електроємність такого відокремленого провідника, потенціал якого змінюється на 1В при наданні йому заряду в 1Кл: $1\text{Ф} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}}$.

Електроємність 1Ф має провідник, який перебуває у вакуумі ($\varepsilon = 1$) і має радіус $9 \cdot 10^6$ км. Тому на практиці вживають і інші одиниці:

$$1 \text{ мікрофарад } 1\text{мкФ} = 10^{-6}\text{Ф},$$

$$1 \text{ пікофарад } 1\text{пФ} = 10^{-12}\text{Ф}.$$

Електроємність відокремленого провідника залежить від наявності і взаємного розміщення оточуючих тіл, в яких за індукцією можуть наводитися заряди від даного зарядженого тіла. Тому, для практичного використання набули

поширення системи з близько розміщеними один від одного провідників, заряди яких однакові за величиною і протилежні за знаком. Такі системи провідників називаються *конденсаторами*.

Електричне поле в конденсаторах повністю (або майже повністю) зосереджене між провідниками. І, отже, зазнає незначних змін під дією зовнішніх полів. Тому електроємність конденсаторів практично не залежить від наявності оточуючих тіл (провідників).

Різнойменно заряджені провідники конденсаторів називають обкладками.

Електроємність конденсатора визначається формулою: $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$, де q – заряд однієї з обкладок конденсатора, $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – різниця потенціалів між ними.

Електроємність конденсаторів також вимірюється в СІ у фарад.

Залежно від форми обкладок конденсатори поділяють на плоскі, сферичні, циліндричні тощо. За природою речовини між обкладками конденсатори поділяють на повітряні, паперові, слюдяні, керамічні, електролітичні.

ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Електричний струм – це упорядкований (напрявлений) рух електрично заряджених частинок або заряджених макроскопічних тіл.

За напрям струму приймають напрямлений рух позитивно заряджених ча-

стинок. Якщо струм створюється негативно зарядженими частинками (наприклад, електронами), то напрям струму вважають протилежним напрямку руху частинок.

Розрізняють електричний струм провідності, який пов'язаний з рухом заряджених частинок відносно того чи іншого середовища (тобто всередині макроскопічних тіл) і конвекційний струм – рух макроскопічних заряджених тіл як цілого (наприклад, заряджених крапель дощу). У подальшому розглядатимемо струм провідності.

Про наявність струму в провідниках можна судити по діям, які він здійснює: нагрівання провідників, зміна їх хімічного складу, створення магнітного поля.

Магнітна дія струму виявляється в усіх без винятку провідниках. У надпровідниках не відчувається виділення теплоти. Хімічна дія струму спостерігається в електролітах.

Магнітна дія породжується не тільки струмом у провідниках або конвекційним струмом, а й змінним електричним полем в діелектриках і вакуумі. Величину, пропорційну швидкості зміни електричного поля у часі, Дж. Максвел назвав струмом зміщення. Струм зміщення входить до рівнянь Максвелла на рівних правах зі струмом, обумовленим рухом зарядів. Тому повний електричний струм, який дорівнює сумі сили струму провідності і струму зміщення, визначає магнітне поле, що ним створюється.

Кількісно електричний струм характеризується скалярною величиною – силою струму I і векторною величиною – густиною електричного струму j .

При рівномірному розподіленні густини струму по перерізу провідника: $I = jS = q_0 n v S$, де q_0 – заряд частинки, n – число частинок в одиниці об'єму, v – середня швидкість напрямленого руху частинок, S – площа поперечного перерізу провідника.

Для створення й існування електричного струму необхідна наявність вільних заряджених частинок (носіїв струму) – позитивних або негативних заряджених частинок, не пов'язаних в єдину електрично нейтральну систему, і сили, яка створює і підтримує їх упорядкований рух. Як правило, такою силою є сила з боку електричного поля всередині провідника, яке визначається електричною напругою на кінцях провідника.

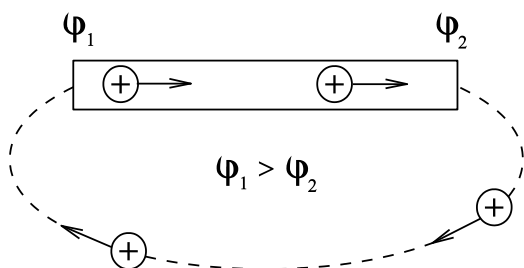
Для того щоб струм був тривалим, енергія електричного поля повинна весь час поповнюватися – іншими словами, потрібен такий пристрій, в якому певний вид енергії безперервно перетворюється на енергію електричного поля. Такий пристрій називається джерелом електрорушійної сили або джерелом струму.

Для отримання електричного струму необхідно створити електричне коло, яке складається з джерела струму, споживачів електричної енергії, вимірювальних і регулювальних приладів, вимикачів та інших елементів, з'єднаних провідниками.

ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА

Сторонні сили. ЕРС.

1. Якщо в провіднику створити електричне поле і не створити умов для його підтримки, то переміщення носіїв струму за короткий час приведе до того, що поле всередині провідника зникне і струм припиниться.



За напрям струму прийнято напрям руху позитивно заряджених носіїв струму. Вони рухаються в напрямі напруженості поля в провіднику, тобто в бік зменшення потенціалу.

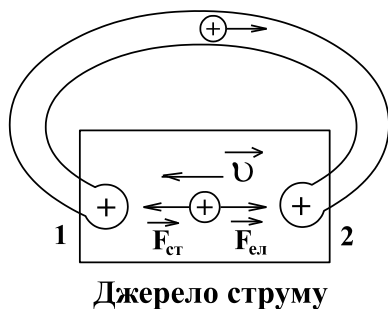
Переміщення носіїв струму в провіднику без підтримки електричного поля приводить до вирівнювання потенціалів уздовж провідників. Тому, для того щоб підтримувати струм тривалий час, треба від кінця провідника з меншим потенціалом (носії струму вважаються позитивно зарядженими) безперервно відводити заряди, які приносяться до цього кінця провідника струмом, а до кінця з більшим потенціалом безперервно їх підводити. Іншими словами, необхідно здійснити кругообіг зарядів, тобто щоб вони рухалися замкненим контуром.

Здійснити такий рух носіїв струму тільки за наявності електростатичного поля не можна. Рух позитивно заряджених носіїв струму від кінця провідника з меншим потенціалом до кінця провідника з більшим потенціалом відбувається проти дії кулонівських сил (сил електростатичного поля). Отже, у замкненому колі повинні бути ділянки, на яких перенос позитивних зарядів відбувається проти сил електростатичного поля.

Переміщення носіїв заряду на цих ділянках можливе лише за допомогою сил не електростатичного походження, які мають назву *сторонніх сил*.

Таким чином, для підтримки струму потрібні сторонні сили, що діють або в усьому колі, або на окремих його ділянках. Ці сили можуть бути обумовлені хімічними процесами, дифузією носіїв струму в неоднорідному середовищі або через межу між двома різнорідними речовинами, електричними (але не електростатичними) полями, які породжуються змінними у часі магнітними полями.

2. Сторонні сили можна охарактеризувати роботою, яку ці сили виконують над зарядами, що переміщуються по колу.



Величина, що дорівнює роботі сторонніх сил над одиничним позитивним зарядом, називається електрорушійною силою (ЕРС), яка діє в колі або на його ділянці. Позначається ЕРС літерою ξ . $\xi = \frac{A_{ст}}{q}$. В СІ

ЕРС вимірюється у вольтах: $1\text{В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$.

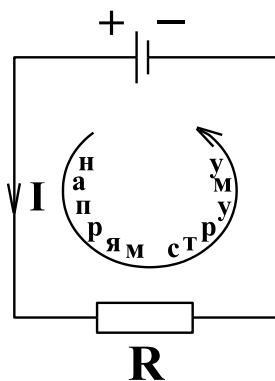
У визначенні ЕРС можна говорити про ту ділянку кола, на якій діють сторонні сили, а також можна говорити про все замкнене коло. Ці визначення еквівалентні.

Дійсно, при русі зарядів між полюсами джерела у зовнішньому колі роботу виконують тільки електростатичні сили $\vec{F}_{ел}$. У внутрішній частині кола робо-

ту виконують як електростатичні так і сторонні сили $\vec{F}_{\text{ст}}$. При цьому робота електростатичних сил $A_{1,2}$ у зовнішньому колі дорівнює роботі електростатичних сил $A_{2,1}$ між тими ж полюсами всередині джерела, взятої з протилежним знаком: $A_{1,2} = -A_{2,1}$. Повна робота по всьому колу складається із суми робіт електростатичних сил на зовнішній ділянці кола і роботи сил на внутрішній ділянці. Остання складається з роботи електростатичних сил $A_{2,1}$ і роботи сторонніх сил $\vec{A}_{\text{ст}}$:

$$A = A_{1,2} + A_{2,1} + A_{\text{ст}} = A_{\text{ст}}.$$

Повна робота всіх сил на повному колі дорівнює роботі тільки сторонніх сил, де вони діють.



Сила струму, напруга і ЕРС – величини алгебраїчні. Вони можуть бути як позитивними, так і негативними, в залежності від вибору напрямку обходу контуру зі струмом. У випадку збігання напрямку струму з обраним позитивним напрямком обходу кола сила струму позитивна. ЕРС джерела позитивна, якщо з обраним напрямком обходу контуру співпадає напрям сторонніх сил у джерелі.

ЕРС зосереджена тільки всередині джерела, а її значення не залежить від струму в колі.

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ПРИ НАЯВНОСТІ ПОСТІЙНИХ СТРУМІВ

Механізм здійснення постійного струму. Стаціонарне електричне поле.

1. За результатом своєї дії джерело струму являє собою процес або пристрій, який відділяє позитивні заряди від негативних. Після розділення заряди переміщуються на електроди і за законом Кулона діють на заряди провідника поблизу електродів, які у свою чергу діють на інші заряди і т.д. У результаті цих колективних взаємодій в колі на поверхні провідників виникає такий розподіл зарядів, який забезпечує існування в середині провідника відповідного електричного поля. Таким чином, роль зарядів на полюсах джерела струму полягає не в тому щоб створити у всіх провідниках безпосередньо відповідне електричне поле, а в тому, щоб забезпечити такий розподіл поверхневих зарядів на провідниках, яке створює потрібне електричне поле всередині них.

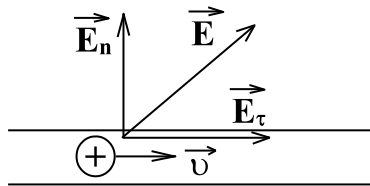
Оскільки взаємодія між зарядами здійснюється за допомогою електромагнітних сил, процес утворення постійного струму в колі після його замикання характеризується швидкістю поширення електромагнітних хвиль, яка залежить від розміру ємностей, індуктивностей та інших характеристик кола. У вільному просторі швидкість поширення електромагнітної дії дорівнює швидкості світла.

Якщо струм постійний, то густина зарядів у будь-якій точці провідника не змінюється з часом, хоча і має місце потік електричних зарядів. Тут на місцях тих зарядів, що переходять в інше місце, надходять нові заряди.

2. Оскільки у провіднику за умови наявності постійного струму $E \neq 0$, потенціал змінюється вздовж провідника, тобто на відміну від електростатич-

ного поля потенціал не є однаковим у всіх точках провідника. Поле всередині провідника створюється нерухомими, сталими у часі поверхневими зарядами і тому так само, як і в електростатиці, електричне поле всередині провідника є потенціальним.

Поza провідником з постійним струмом силові лінії розміщені під кутом до поверхні провідника.



Тангенціальна складова напруженості електричного поля і створює напрямлений рух носіїв струму.

Силовой характеристикою стаціонарного електричного поля – електричного поля за наявності постійного струму є вектор напруженості \vec{E} , але це сумарний вектор, який являє собою суму двох векторів: $\vec{E}_{\text{кул}}$ – вектор напруженості поля кулонівських сил; $\vec{E}_{\text{стор}}$ – вектор напруженості поля сторонніх сил, тобто $\vec{E} = \vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{стор}}$.

Енергетичною характеристикою стаціонарного електричного поля є напруга U : $U = \frac{A_{\text{кул}}}{q} + \frac{A_{\text{стор}}}{q}$.

Падінням напруги або просто *напругою* на ділянці кола називається фізична величина, що чисельно дорівнює роботі, яка виконується сумарним полем кулонівських і сторонніх сил при переміщенні вздовж кола одиничного позитивного заряду на цій ділянці.

$$\frac{A_{\text{кул}}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2; \quad \frac{A_{\text{стор}}}{q} = \xi; \quad U = \varphi_1 - \varphi_2 + \xi.$$

Отже, відмінність стаціонарного електричного поля від електростатичного полягає в наступному: напруженість стаціонарного поля всередині провідників не дорівнює нулю – саме тому в них і переміщуються вільні заряди, лінії напруженості не перпендикулярні до поверхні провідників, поверхні провідників не є еквіпотенціальними, розподіл зарядів на поверхні провідників зі струмом інший, ніж при електростатичній рівновазі зарядів, яка встановлюється у випадку розриву кола. Водночас, електростатичне і стаціонарне поле мають спільні риси: обидва вони потенціальні, лінії напруженості обох полів не замкнені – вони розпочинаються і закінчуються на зарядах.

ЗАКОН ОМА

Закон Ома для однорідної, неоднорідної ділянок і повного кола.

1. Німецький фізик Г. Ом у 1827р. експериментально довів, що сила струму I в провіднику прямо пропорційна напрузі на кінцях провідника: $I = \frac{U}{R}$.

У законі Ома знайшла відображення необхідність електричного поля для підтримки постійного електричного струму в середовищі.

Закон Ома використовується для введення нової фізичної величини – електричного опору: $R = \frac{U}{I}$. Формула $R = \rho \frac{l}{S}$, що виражає залежність опору однорідного стержня сталого перерізу від його довжини і площі поперечного перері-

зу, також ґрунтується на законі Ома. Безпосередньо з досліду за допомогою цієї формули можна встановити, що опір стержня пропорційний його довжині і обернено пропорційний площі поперечного перерізу. Коефіцієнт пропорційності ρ був названий питомим опором речовини провідника.

Закон Ома сам по собі не дає ніяких підстав для розкриття фізичного змісту електричного опору, це можна зробити тільки, якщо, виходячи з певних уявлень про механізм електропровідності струму, теоретично вивести цей закон.

Використовуючи поняття густини струму, закон Ома записується у формі: $\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \gamma \vec{E}$, де $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – питома електропровідність.

Закон Ома не є універсальним. Він виконується, якщо γ не залежить від напруженості поля або від напруги на кінцях даної ділянки кола.

Якщо ділянка кола однорідна, тобто не містить джерела струму, то для такого випадку напруга збігається з різницею потенціалів $U = \varphi_A - \varphi_B$ і закон Ома можна записати так: $I = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{R}$.

2. Для ділянки кола, яка містить ЕРС, закон Ома можна записати у вигляді: $I = \frac{(\varphi_A - \varphi_B) + \xi_{AB}}{R_{AB}}$ або $U_{AB} = IR_{AB} = (\varphi_A - \varphi_B) + \xi_{AB}$.

Величина $U_{AB} = IR_{AB}$ має назву електричної напруги на ділянці АВ.

Щоб не помилитися у кожному конкретному випадку, з яким знаком треба брати різницю потенціалів $(\varphi_A - \varphi_B)$ або $(\varphi_B - \varphi_A)$, корисно закон Ома записати у вигляді: $\varphi_B = \varphi_A - IR_{AB} + \xi_{AB}$.

Знак "мінус" при члені IR_{AB} відображає той факт, що у напрямку густини струму відбувається падіння (зменшення) потенціалу на величину, яка дорівнює добутку сили струму на опір. Наявність ЕРС приводить до додаткового стрибка потенціалу: в залежності від знаку ЕРС потенціал може збільшуватися або зменшуватися на величину, яка дорівнює модулю ЕРС. В залежності від полярності включення джерела цей стрибок потенціалу може бути як позитивним (потенціал збільшується на величину, що дорівнює модулю ЕРС, при проходженні джерела у напрямі густини струму), так і негативним (потенціал зменшується на величину, яка дорівнює модулю ЕРС, при проходженні джерела у напрямі протилежному напрямку густини струму).

Знак ЕРС визначається напрямом двох векторів: напруженості поля сторонніх сил $\vec{E}_{стор}$ і вектора переміщення $d\vec{l}$ ($\xi_{AB} = \int_A^B \vec{E}_{стор} d\vec{l} = \frac{A_{стор}}{q}$).

Вектор $\vec{E}_{стор}$ завжди напрямлений від негативного полюсу джерела до його позитивного полюсу (в дійсності причиною утворення полюсів є дія сторонньої сили, і слід говорити навпаки: позитивний полюс джерел знаходиться на тому його кінці, до якого напрямлений вектор напруженості поля сторонніх сил). Отже, якщо на схемі вказані знаки полюсів джерела, то тим самим вказано і напрям вектора $\vec{E}_{стор}$. Але знак ЕРС визначається ще й напрямом вектора переміщення $d\vec{l}$. Його вибрали таким, щоб він збігався з напрямом густини струму. І, якщо обидва вектори – $\vec{E}_{стор}$ і $d\vec{l}$ – мають однакові напрями, то ЕРС вважається позитивною. Якщо ж вектори $\vec{E}_{стор}$ і $d\vec{l}$ мають протилежні напрями, то

ЕРС буде негативною. Щоб підкреслити можливість того чи іншого знаку ЕРС записують:

$$\varphi_B = \varphi_A - IR_{AB} \pm |\xi_{AB}|.$$

У цій формулі знак "+" або "-" при $|\xi_{AB}|$ вибирається за таким принципом: ЕРС вважають позитивною, якщо напрям струму, що вона створила сама, збігається з напрямом струму, що дійсно тече в провіднику, в іншому випадку – ЕРС вважається негативною.

3. Закон Ома для замкненого кола, вважаючи, що початок і кінець ділянки – точки А і В – збігаються одна з одною, записують так: $I = \frac{\xi}{R}$, де R – повний опір кола.

Якщо на ділянці кола, або в замкненому контурі діють не одна, а декілька ЕРС, то в законі Ома слід брати алгебраїчну суму всіх ЕРС. Тоді закон Ома для замкненого кола записують так: $I = \frac{\sum \xi}{\sum R}$.

$\sum R$ – сума опорів усіх ділянок, що складають замкнений контур, тобто повний опір замкненого кола, враховуючи і внутрішній опір джерела ЕРС.

КЛАСИЧНА ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ МЕТАЛІВ **Основні положення теорії. Вивід законів Ома і Джоуля-Ленца.**

1. Теорія, яка пояснює різні властивості речовини існуванням і рухом в ній електронів, називається електронною. В основі електронної теорії металів лежить уявлення про електронний газ, який складається з вільних електронів.

Основи класичної (не квантової) теорії металів заклав німецький фізик П.Друде. Він припустив, що електрони в металі утворюють своєрідний газ, на який можна поширити закони ідеального газу. В 1905р. Г.Лоренц розвинув дані ідеї Друде, підвівши під них більш точну теоретичну основу – статистику Максвелла-Больцмана.

В основу класичної електронної теорії металів покладено такі положення:

- Метал являє собою систему іонів, які утворюють кристалічну решітку і здійснюють теплові коливання біля вузлів цієї решітки, і електронів, які вільно рухаються між іонами.

- Такий електронний газ повинен підлягати всім законам ідеального газу і, зокрема, закону рівномірного розподілу енергії за ступенями свободи. Так, середня кінетична енергія теплового руху, яка припадає на один електрон: $\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT$, де m – маса електрона, \bar{v} – середня квадратична швидкість теплового руху електрона.

Вважається, що середня довжина вільного пробігу електрона не залежить від його швидкості.

- Внаслідок хаотичного руху електронів при відсутності зовнішнього електричного поля ніякого домінуючого напрямку їхнього переміщення немає. При наявності електричного поля у провіднику на тепловий рух електронів накладається так званий "дрейф" у напрямі, протилежному до напрямку напруже-

ності електричного поля.

• Вважається, що електрон набуває енергії впорядкованого руху під дією зовнішнього електричного поля тільки на шляху свого вільного пробігу. Також вважається, що зіткнення електрона з іоном не пружне, тобто при зіткненні електрон передає іону енергію дрейфового руху. Внаслідок цього температура кристалічної решітки підвищується, тобто виділяється ленц-джоулева теплота.

2. Однією із задач теорії електропровідності металів є вивід законів електричного струму, встановлених експериментально (законів Ома і Джоуля-Ленца) на основі певних уявлень про механізм електричного струму.

Закон Ома.

Припустимо, що час вільного пробігу τ між двома послідовними зіткненнями однаковий для всіх електронів, а при кожному зіткненні електрон передає решітці накопичену енергію повністю і тому після зіткнення розпочинає рух без початкової швидкості.

Густина струму $j = ne\bar{v}$, де n – концентрація електронів провідності, e – заряд електрона, \bar{v} – швидкість дрейфу.

На кожний електрон діє сила $e \cdot E$, і електрон набуває прискорення $\frac{eE}{m}$. Тому до кінця вільного пробігу швидкість електрона дорівнює $u_{max} = \frac{eE}{m} \tau$.

Між зіткненнями електрон рухається рівноприскорено, тому середнє значення швидкості дорівнює половині її максимального значення: $\bar{v} = \frac{eE}{2m} \tau$.

Швидкість дрейфу, як видно, пропорційна напруженості поля E . Тому можна записати: $\bar{v} = bE$, де $b = \frac{e}{2m} \tau$ не залежить від E . Величина b називається рухливістю електронів. Вона дорівнює швидкості дрейфу в полі з напруженістю рівною одиниці.

$$\text{Отже, } j = \frac{ne^2\tau}{2m} E.$$

Густина струму пропорційна напруженості поля, а це і виражається законом Ома.

$$\text{Для питомої електропровідності } \gamma \text{ отримаємо вираз: } \gamma = \frac{1 ne^2}{2 m} \tau.$$

Він показує, що електропровідність тим більша, чим більша концентрація електронів провідності і чим більший час вільного пробігу τ .

3. Закон Джоуля-Ленца.

Якщо постійний струм проходить по нерухомому провіднику, в якому відсутні хімічні реакції, робота струму ($A = IUt$) йде на збільшення внутрішньої енергії провідника і він нагрівається. Вивчаючи теплову дію електричного струму, англійський вчений Д.Джоуль і російський вчений Е.Ленц відкрили закон, який формулюється так: кількість теплоти, що виділяється в провіднику при проходженні в ньому постійного струму, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника і часу проходження струму $Q = I^2 R t$.

Розділивши праву частину цієї формули на об'єм провідника Sl і час τ , і, враховуючи, що $I = jS$, $R = \rho \frac{l}{S}$, отримуємо: $Q = j^2 S^2 \rho \frac{l}{S} \tau = \rho j^2 S l \tau$. Але $j = \gamma E$

і $\rho = \frac{1}{\gamma}$, тому можна отримати три види запису закону Джоуля-Ленца в диференціальній формі, позначивши кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму металу за 1с, через W : $W = \rho j^2$, $W = \gamma E^2$, $W = jE$.

Кожна рівність відповідає одній із трьох форм запису цього закону в інтегральній формі: $\frac{Q}{\tau} = I^2 R$, $\frac{Q}{\tau} = \frac{U^2}{R}$, $\frac{Q}{\tau} = UI$.

До кінця вільного пробігу електрони набувають під дією поля кінетичну енергію: $\frac{1}{2} m v_{max}^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2 \tau^2}{m} E^2$.

Згідно зробленому припущенню вся ця енергія передається решітці при зіткненні і йде на збільшення внутрішньої енергії.

За одиницю часу кожний електрон має $\frac{1}{\tau}$ зіткнень, отже, у стільки ж разів більша енергія, що передається провіднику.

У кожній одиниці об'єму є n електронів. Тоді для зміни внутрішньої енергії провідника, яка виділяється в одиниці об'єму, можна записати $W = \frac{1}{2} \frac{n e^2 \tau}{m} E^2$ або $W = \gamma E^2 = \frac{1}{\rho} E^2$, де $\rho = \frac{1}{\gamma}$ – питомий опір металу. А це і є закон Джоуля-Ленца.

Таким чином, класична електронна теорія добре пояснює існування електричного струму металів, закон Ома і Джоуля-Ленца, дозволяє виразити питому електропровідність через атомарні сталі металу. Але у деяких питаннях ця теорія приводить до висновків, які суперечать дослідам.

МАГНЕТИЗМ

МАГНІТНЕ ПОЛЕ

Магнітне поле. Магнітна індукція і силові лінії магнітного поля. Постійні магніти і гіпотеза Ампера. Способи введення поняття "магнітна ін-

дукція" в шкільному курсі фізики.

1. Під терміном "Магнетизм" розуміють: 1) особливу форму взаємодії між електричними струмами, між струмами і магнітами, між магнітами; 2) розділ фізики, який вивчає цю взаємодію і властивості речовин (магнетиків), в яких воно проявляється.

Передача магнітних взаємодій, що виникають між електрично зарядженими частинками, що рухаються, здійснюється *магнітним полем*. Воно являє собою, поряд з електричним полем, один із проявів електромагнітного поля.

Термін "Магнітне поле" ввів у 1845р. М.Фарадей.

Між магнітним і електричним полями немає повної симетрії. Джерелами електричного поля є електричні заряди, але аналогічних магнітних зарядів ще не спостерігали у природі, хоча гіпотези про їх існування висловлювалися.

Джерело магнітного поля – електричний заряд, який рухається, тобто електричний струм. В атомних масштабах для електронів і нуклонів (протонів, нейтронів) є два типи мікроскопічних струмів – орбітальні, пов'язані з переносом центру тяжіння цих частинок в атомі, і спінові, пов'язані з їх внутрішнім рухом.

Магнітне поле вихрове (його силові лінії завжди замкнені) і воно не потенціальне. Тому характеризувати магнітне поле алгебраїчною величиною – потенціалом, як це було зроблено для електричного поля, не можна. Водночас, для магнітного поля вводиться силова його характеристика, яка має назву індукції магнітного поля.

Важлива особливість магнітного поля полягає в тому, що воно діє тільки на рухомі в цьому полі електричні заряди. Отже, взаємодія двох електричних зарядів, що рухаються один відносно одного, не обмежується їх електричною взаємодією, тому що між ними існує ще й магнітна взаємодія.

2. Основною характеристикою магнітного поля є векторна фізична величина – *магнітна індукція* \vec{B} . Магнітна індукція є силовою характеристикою магнітного поля в кожній його точці. Напрямок і величину вектора магнітної індукції визначають за дією магнітного поля на магнітну стрілку та провідник із струмом.

За напрям вектора магнітної індукції у заданій точці поля приймають напрям вектора сили, з якою поле діє на північний полюс нескінченно малої магнітної стрілки, розміщеної в цій точці. Така мала магнітна стрілка не буде спотворювати досліджуване магнітне поле.

Дослід показує, що для магнітного поля, так само як і для електричного, у широкій області змін магнітної індукції справджується принцип суперпозиції: якщо є декілька контурів зі струмом, кожний з яких створює магнітне поле з індукціями \vec{B}_1 , \vec{B}_2 і т.д., то магнітна індукція результуючого поля дорівнює векторній сумі індукцій магнітних полів окремих контурів: $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$.

Для графічного зображення магнітних полів зручно користуватися лініями магнітної індукції. *Лініями магнітної індукції* (силовими лініями) називаються криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора \vec{B} в

цих точках поля.

Лінії магнітної індукції можна спостерігати за допомогою залізних ошуків, які намагнічуються в досліджуваному полі й поводять себе подібно маленьким магнітним стрілкам.

Лінії магнітної індукції завжди *замкнені* й охоплюють провідник зі струмом. Поблизу провідника лінії магнітної індукції лежать у площинах, перпендикулярних до провідника.

Напрямок ліній індукції магнітного поля визначається за правилом свердлика: якщо вкручувати свердлик по напрямку руху струму в провіднику, то напрям руху його рукоятки вкаже напрям ліній магнітної індукції.

3. Постійні магніти (полосові, підковоподібні, магнітні стрілки) мають два різнойменних полюси – північний, або позитивний, і південний, або негативний. Одноіменні полюси взаємно відштовхуються, а різнойменні – взаємно притягуються.

Лінії магнітної індукції постійного магніту виходять з його північного полюсу і входять у південний. На перший погляд здається, що тут є повна аналогія з силовими лініями електростатичного поля, причому полюси магніту відіграють роль магнітних "зарядів", що створюють магнітне поле. Але досліди показали, що розрізаючи постійний магніт на частини, не можна розділити полюси, тобто не можна отримати магніт або з одним північним, або з одним південним полюсом. Отже, на відміну від електричних зарядів, вільних магнітних зарядів у природі не існує. Немає їх і в полюсах постійних магнітів. Тому полюси постійного магніту не можуть бути особливими точками його магнітного поля, а лінії магнітної індукції не можуть обриватися на полюсах. Дослідження показали, що всередині полосових магнітів є магнітне поле, подібне полю всередині соленоїда. Лінії магнітної індукції цього поля є продовженням ліній індукції поза полосовим магнітом. Цим було доведено, що лінії індукції поля постійних магнітів також замкнені.

Повна аналогія між магнітними полями полосових магнітів і соленоїдів дозволила французькому фізику А.Амперу (1821-1882) висловити гіпотезу про те, що магнітні властивості постійних магнітів обумовлені існуючими в них мікрострумами. Про природу і характер цих мікрострумів Ампер нічого не міг сказати, адже в той час вчення про будову речовини знаходилося на початковому етапі. Лише після відкриття електрона і з'ясування будови атомів і молекул, тобто майже через 100 років гіпотеза Ампера була яскраво підтверджена і покладена в основу сучасних уявлень про магнітні властивості речовини.

До відома.

Магнітні поля у природі різноманітні за масштабами і за ефектами, які вони викликають.



Застосування компаса, магнітна стрілка якого завжди встановлюється цілком певно в кожному місці Землі, свідчить про те, що Земля є магніт і у просторі біля Землі існує магнітне поле.

Магнітні полюси Землі не збігаються з географічними полюсами. Південний магнітний полюс Землі зна-

ходиться у північній півкулі. Північний полюс лежить у південній півкулі.

Внаслідок незбігання магнітних і географічних полюсів між площиною магнітного меридіана (у цій площині встановлюється стрілка компаса) і площиною географічного меридіана завжди для кожного місця на Землі існує певний кут, який називається *кутом схилення*. Компасна стрілка встановлюється не горизонтально до поверхні Землі, а під деяким кутом, який називають *кутом нахилення*. Це означає, що лінії магнітного поля не паралельні до поверхні Землі, а дещо нахилені. Кут нахилення також різний для різних точок Землі. Силві лінії магнітного поля Землі на екваторі напрямлені горизонтально до її поверхні, біля магнітних полюсів Землі — вертикально, а у всіх інших місцях — під деяким кутом.

Магнітне поле Землі, яке утворює земну магнітосферу, сягає відстаней до 70-80 тисяч кілометрів у напрямі Сонця і на мільйони кілометрів у протилежному напрямі.

У навколосемному просторі магнітне поле створює магнітну пастку для заряджених частинок високої енергії – радіаційний пояс. Походження магнітного поля Землі пов'язують з конвекційними рухами провідної рідкої речовини у земному ядрі.

Із інших планет Сонячної системи лише Юпітер і Сатурн мають власні магнітні поля достатні для створення стійких планетарних магнітних пасток.

Міжпланетне магнітне поле – це, головним чином, поле сонячного вітру (плазми сонячної корони, яка безперервно розширюється). Силві лінії регулярного міжпланетного магнітного поля мають вигляд розкручених спіралей, що йдуть від Сонця (їх форма обумовлена додаванням радіального руху плазми і обертанням Сонця). Магнітне поле міжпланетної плазми має секторну структуру: в одних секторах воно напрямлене від Сонця, в інших – до Сонця. Регулярність міжпланетного магнітного поля може порушуватися через розвиток різних видів плазмової нестійкості, проходження ударних хвиль і поширення потоків швидких частинок, породжених сонячними спалахами.

У всіх процесах на Сонці – спалахах, появи плям і протуберанців, народженні сонячних космічних променів – магнітне поле відіграє важливішу роль.

Віддаленість зірок не дозволяє поки що спостерігати у них магнітних полів типу сонячних. В той же час більше ніж у двохсот так званих магнітних зірок виявлені аномально великі поля.

У явищах мікросвіту роль магнітних полів так само істотна, як і в космічних масштабах. Це пояснюється існуванням у всіх частинок – структурних елементів речовини (електронів, протонів, нейтронів) магнітного моменту, а також дією магнітного поля на рухомі електричні заряди.

4. Поняття магнітної індукції в шкільному курсі фізики може бути введено різними шляхами. Вибираючи один із них враховують наступне: 1) який з дослідів, що ілюструє магнітну взаємодію, приймається за основоположний; 2) що стає індикатором магнітного поля для його кількісної характеристики; 3) можливість постановки відповідного експерименту; 4) рівень розвитку учнів – їх здатність до абстрактного мислення. На ці питання треба знайти відповіді, ознайомлюючись з викладом поняття у підручниках.

Можливі такі шляхи введення вектора магнітної індукції:

1) за допомогою сили Ампера, що діє у магнітному полі на елемент провідника зі струмом ($B = \frac{F_{max}}{I\Delta l}$, де I – сила струму в провіднику, а Δl – його довжина);

2) за дією магнітного поля на контур зі струмом, при цьому $B = \frac{M_{max}}{IS}$, де M_{max} – максимальний обертаючий момент, який діє на контур зі струмом у магнітному полі, I – сила струму в контурі, S – площа контуру;

3) на основі закону електромагнітної індукції ($\xi_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, але $\Phi = BS$, що дає можливість визначити модуль вектора магнітної індукції B , якщо виміряна ЕРС індукції ξ_i , відома площа контуру S і час Δt);

4) за допомогою сили Лоренца: $B = \frac{F_{max}}{qv}$, де на рухомий заряд q , що рухається зі швидкістю v , діє максимальна сила Лоренца F_{max} ($\vec{v} \perp \vec{B}$).

МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ

Магнетики. Діамагнетики. Парамагнетики. Феромагнетики.

1. Дослід і теорія свідчать про те, що всі речовини, вміщені в магнітне поле, набувають магнітних властивостей – намагнічуються. Макроскопічні тіла, здатні намагнічуватися під впливом зовнішнього магнітного поля, називають *магнетиками*. До магнетиків належать всі без винятку тіла, але намагнічуються вони по-різному. У багатьох магнетиків магнітні властивості виявляються дуже слабо. Вони виявляються не лише у випадку макроскопічних тіл, а й характерні для окремих молекул, атомів, атомних ядер, електронів. Магнітні властивості речовини визначаються структурою їх атомів і характером взаємодії між ними.

Подібно до того як діелектрики, вміщені в зовнішнє електричне поле, поляризуються і в них виникає внутрішнє електричне поле, в будь-якій речовині, вміщеній в зовнішнє магнітне поле, створюється внутрішнє магнітне поле. Вектор магнітної індукції \vec{B} в магнетик дорівнює сумі векторів магнітної індукції зовнішнього поля \vec{B}_0 та магнітної індукції власного поля магнетика \vec{B}' : $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$, причому \vec{B}' визначається тільки магнітними властивостями середовища $\vec{B} = \mu\vec{B}_0$, де μ – відносна магнітна проникність середовища. Вона показує у скільки разів змінюється індукція магнітного поля, якщо простір, у якому воно існує, заповнити даним магнетиком. Залежно від значення магнітної проникності μ всі речовини поділяють на три групи: діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики.

Під час аналізу процесів, що відбуваються в діелектрику, вміщеному в зовнішнє електричне поле, користуються поняттям електричного дипольного моменту – вектора \vec{P} , чисельно рівного добутку l (відстані між точковими зарядами, що утворюють диполь) і q (значення зарядів, що утворюють диполь): $P = ql$. Вектор \vec{P} напрямлений від негативного заряду ($-q$) до позитивного $+q$. Дипольний момент визначає електричне поле диполя. Поява у молекули дипо-

льного моменту означає появу власного її електричного поля. Так у неполярної молекули до внесення її у магнітне поле $P = 0$. Кожний із зарядів, з яких складається молекула, створює електричне поле. У неполярної молекули ці поля скомпенсовані і молекула в цілому не має власного електричного поля. Під дією зовнішнього електричного поля неполярна молекула перетворюється в систему зарядів, яку можна вважати диполем і $P \neq 0$. Процес і результат поляризації розглядається з врахуванням утворення або орієнтації дипольних моментів.

Аналогічно під час розгляду процесу і результатів намагнічування, користуються поняттям магнітного моменту.

Магнітний момент – основна величина, що характеризує магнітні властивості речовини.

Джерелом магнетизму, згідно класичної теорії електромагнітних явищ, є макро і мікро (атомні) електричні струми. Елементарним джерелом магнетизму вважають замкнений струм.

Добуток сили струму I , що протікає у витку, на площу S цього витка, називають магнітним моментом P_m витка зі струмом: $P_m = IS$. Магнітний момент – векторна величина, напрямлена вздовж осі витка зі струмом в той самий бік, що і індукція \vec{B} його магнітного поля. З кінця вектора \vec{P}_m струм у витку спостерігається таким, що йде проти годинникової стрілки.

Згідно уявленням класичної фізики, електрони в атомах рухаються по деяким замкненим орбітам. Такий рух кожного електрона еквівалентний замкненому контуру струму. Тому, будь-який атом або молекулу, з точки зору їх магнітних властивостей, можна розглядати як деяку сукупність електронних мікрострумів.

Магнітний момент \vec{P}_m електричного струму, створеного рухом електрона по орбіті, називається орбітальним магнітним моментом електрона. Вектором орбітального магнітного моменту атома називається векторна сума орбітальних магнітних моментів всіх його електронів.

Розглядаючи процеси і результат намагнічування магнетиків не враховується вплив, який здійснюють на магнітні властивості речовини магнітні моменти ядер. Справа в тому, що магнітні моменти ядерних частинок (нейтронів і протонів) приблизно у дві тисячі разів менші, порівняно з магнітними моментами електронів. Тому у першому наближенні магнітними моментами атомних ядер можна нехтувати порівняно з магнітними моментами електронних оболонок атома.

2. *Діамагнетиками* називаються речовини, магнітні моменти атомів або молекул яких при відсутності зовнішнього магнітного поля дорівнюють нулю. Іншими словами, в атомах або молекулах діамагнітних речовин векторна сума орбітальних магнітних моментів всіх електронів дорівнює нулю. Такі атоми і молекули не створюють власного магнітного поля.

Діамагнетиками є інертні гази, більшість органічних сполук, багато металів (вісмут, цинк, золото, срібло, ртуть), смоли, вода, скло тощо.

При внесенні діамагнетика в магнітне поле змінюється характер руху еле-

ктронів, що приводить до виникнення в кожному атомі магнітного моменту, напрямленого протилежно зовнішньому магнітному полю. Отже, всередині діамагнетика виникає власне магнітне поле, яке послаблює зовнішнє магнітне поле. Тому магнітна проникність діамагнетиків $\mu = \frac{B}{B_0} < 1$.

Природа діамагнетизму складніша. Щоб її зрозуміти, нагадаємо явище електромагнітної індукції. При зміні магнітного потоку через електричний контур в останньому виникає індукований електричний струм. Згідно з правилом Ленца, цей струм має такий напрям, що створюване ним магнітне поле перешкоджає зміні магнітного потоку. В контурі, який не має електричного опору, наприклад у надпровідному контурі або в контурі, створеному електроном, що рухається в атомі своєю орбітою, індукований струм не затухає. Індукція магнітного поля індукованого струму спрямована проти індукції зовнішнього поля, так що сумарна магнітна індукція в речовині зменшується.

Поведінка діамагнетиків у магнітному полі істотно відрізняється від поведінки діелектриків з неполярними молекулами в електричному полі. Діелектрик поляризується у напрямі поля. Тому легкий стержень, виготовлений з діелектрика і вільно підвішений в однорідному електричному полі, встановлюється так, щоб вісь його була напрямлена паралельно полю. В неоднорідному електричному полі стержень діелектрика втягується в область більш сильного поля.

Стержень з діамагнітного матеріалу (наприклад, вісмуту) намагнічується в напрямі, протилежному напрямку зовнішнього магнітного поля. Тому в неоднорідному магнітному полі діамагнетик відштовхується в область більш слабкого поля і встановлюється так, що його вісь була перпендикулярна до напрямку поля.

3. Якщо векторна сума орбітальних магнітних моментів у всіх електронів атома (або молекули) не дорівнює нулю, то атом в цілому має певний магнітний момент. Такі атоми (молекули) називаються *парамагнітними*, а речовини, що з них складаються, – *парамагнетиками*.

До парамагнетиків належать: кисень, окис азоту, алюміній, платина, рідкоземельні елементи, лужні і лужноземельні метали тощо.

До внесення парамагнетика у зовнішнє магнітне поле магнітні моменти атомів розміщені хаотично, що є наслідком теплового руху частинок. Це явище аналогічне розміщенню дипольних моментів у полярному діелектрику.

Процес намагнічування парамагнетика полягає в упорядкованому розміщенні магнітних моментів його атомів (або молекул) щодо напрямку магнітного поля, в подоланні при цьому впливу теплового руху. У парамагнітному тілі виникає власне магнітне поле, напрямлене в той самий бік, що і зовнішнє магнітне поле. Тому при внесенні парамагнітного стержня в магнітне поле між полюсами магніту він розміщується вздовж цього поля.

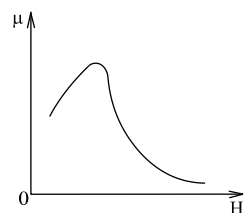
Здатність парамагнетиків намагнічуватися різна при різних температурах (пригадайте поляризацію діелектриків з полярними молекулами).

4. Феромагнітними речовинами – *феромагнетиками* – називаються такі речовини, в яких внутрішнє (власне) магнітне поле може в сотні й тисячі разів

перевищувати зовнішнє магнітне поле, що його спричинило.

До феромагнетиків належать залізо, нікель, кобальт і ряд сплавів, причому феромагнетизм виявлено лише в кристалічному стані перелічених речовин.

Якщо у парамагнетиків $\mu > 1$, то у феромагнетиків $\mu \gg 1$.



Істотною особливістю феромагнетиків є залежність μ від напруженості зовнішнього магнітного поля. Відносна магнітна проникність μ феромагнетиків спочатку зростає із збільшенням H , досягає максимуму і потім спадає, наближаючись до одиниці при сильних намагнічуючих полях.

Для феромагнетиків характерна ще одна особливість при певній для кожного феромагнетика температурі T_k , яку називають точкою Кюрі, вони втрачають притаманні їм властивості і перетворюються на звичайні парамагнетики.

Класична теорія феромагнетизму була розроблена французьким фізиком П.Вейсом. В основу цієї теорії покладено дві гіпотези. Перша з них полягає у тому, що в певній області температур (від абсолютного нуля до точки Кюрі) феромагнетикам властиве спонтанне намагнічування, яке не залежить від наявності зовнішнього намагнічуючого поля. Друга гіпотеза полягає в тому, що будь-яке феромагнітне тіло розбивається на малі області, яким характерне однорідне спонтанне намагнічування. Такі області називають доменами. Лінійні розміри доменів сягають $10^{-2} - 10^{-3}$ см.

Без зовнішнього магнітного поля вектори магнітних моментів окремих доменів орієнтовані в просторі хаотично, так що результуючий магнітний момент всього тіла дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле, що діє на феромагнетик, орієнтує магнітні моменти не окремих частинок, як це було у випадку парамагнетиків, а цілих областей спонтанного намагнічування. Очевидно, магнітне насичення настає тоді, коли вектори магнітних моментів у всіх областях спонтанного намагнічування встановлюються паралельно зовнішньому магнітному полю.

Досліди Ейнштейна і де-Гааза довели, що у створенні спонтанної намагніченості феромагнетиків обертальні магнітні моменти практично не приймають участь.

Електрон крім орбітального магнітного моменту має ще власний механічний момент імпульсу, який назвали спіном, і відповідним власним магнітним моментом.

Спочатку елементарне уявлення про спін пов'язувалося з обертанням електрона навколо власної осі. Але у подальшому з'ясувалося, що така модель спіну не правильна. Зараз доведено, що електрону притаманні деякі власні механічний і магнітний моменти, подібно тому, як йому притаманні заряд і маса. Спін є невід'ємною властивістю електрона.

Для прикладу розглянемо феромагнетик – залізо.

В ізольованому атомі заліза орбітальні рухи електронів дають певний орбітальний магнітний момент. Але при утворенні кристалу заліза відбувається своєрідне "заморожування" електронних орбіт, що приводить до того, що орбітальні магнітні моменти практично не приймають участі у створенні магнітних моментів атомів. Причини такого "заморожування" ще не до кінця з'ясовані.

Водночас вимірювання показали, що магнітні властивості феромагнітних речовин пов'язані з некомпенсованими складовими магнітними моментами невеликого числа електронів атома.

Експериментально досліджував властивості феромагнетиків О.Г.Столетов (1871р.). Він, зокрема, встановив важливу властивість феромагнетиків: здатність зберігати намагнічування після того, як зовнішнє магнітне поле перестас діяти.

При намагнічуванні феромагнетика відбувається зміна його форми і об'єму. Це явище називається *магніострикцією*. Воно було відкрито Д.Джоулем у 1842р.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Явище електромагнітної індукції.

Електромагнітна індукція – це явище виникнення електрорушійної сили (ЕРС індукції) в провідному контурі, який знаходиться у змінному магнітному полі або рухається у постійному магнітному полі.

Як видно, вказуються два випадки виникнення ЕРС індукції.

У першому випадку провідник знаходиться у змінному магнітному полі. Якщо провідник замкнений, то в ньому існуватиме індукційний струм. Виникнення ЕРС індукції і індукційного струму у даному випадку пояснюється тим, що змінне магнітне поле породжує змінне електричне поле (індукційне електричне поле), яке діє на вільні заряджені частинки у провіднику, результатом чого стає виникнення ЕРС індукції.

ЕРС індукції визначається за формулою $\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt}$. ЕРС індукції в контурі пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену цим контуром (*закон Фарадея*).

Знак мінус у правій частині формули визначає напрям індукційного струму.

Професор Петербургського університету Е.Х.Ленц досліджував зв'язок між напрямом індукційного струму і характером зміни магнітного потоку, що створив цей струм. У 1834р. він встановив такий закон (*закон Ленца*): при будь-якій зміні магнітного потоку через поверхню, обмежену замкненим контуром, в останньому виникає індукційний струм такого напрямку, що його магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку.

Треба звернути увагу на те, що явище електромагнітної індукції існує і без провідників. Змінне магнітне поле завжди породжує навколо себе вихрове електричне поле. Провідник дозволяє лише виявити його дію.

Другий випадок пов'язаний з виникненням ЕРС індукції в провіднику, що рухається в незмінному магнітному полі, перпендикулярно силовим лініям. Пояснюється це явище так: разом з провідником у магнітному полі рухаються вільні заряджені частинки, що в провіднику, на які діє сила Лоренца, створюючи зміщення цих частинок вздовж провідника. Тому між кінцями даного провідника виникає напруга.

І для даного випадку застосовується закон Фарадея. Але з нього можна отримати наступну формулу для ЕРС індукції: $\xi_i = Blv \cdot \cos\alpha$, де v – швидкість руху провідника довжиною l в однорідному магнітному полі з індукцією B , α – кут між векторами \vec{B} і \vec{v} .

Напрямок індукційного струму в такому провіднику визначається правилом правої руки: якщо розмістити праву руку так, щоб вектор магнітної індукції \vec{B} входив у долоню, а відігнутий великий палець співпадав з напрямком перпендикулярної до провідника складової швидкості його руху, то витягнуті чотири пальці вкажуть напрям створеного електричного поля електромагнітної індукції, що виникає в провіднику.

Провідник, рухаючись у магнітному полі, повинен перетинати магнітні силові лінії.

Указані два різних пояснення явища електромагнітної індукції зумовлено тим, що вони проводяться з позиції однієї системи відліку в концепції електродинаміки нерухомих середовищ.

Теорія відносності приводить до такого висновку: незважаючи на те, що в системі координат, пов'язаної з магнітом, відносно якого рухається провідник, є тільки магнітне поле, на заряди в цьому провіднику в системі координат, пов'язаної з ним, діє електричне поле. Отже, немає ніякої об'єктивної різниці в тлумаченні вказаних двох випадків.

До відома.

Початком досліджень електромагнітних явищ стало явище, яке було відкрито у 1820р. датським фізиком Г.Ерстедом. Він виявив, що при пропусканні по провіднику електричного струму магнітна стрілка, яка знаходилася під провідником паралельно йому, поверталася навколо власної осі, намагаючись розміститися перпендикулярно провіднику зі струмом.

Французький фізик А.Ампер (1821-1822), досліджуючи дію провідників зі струмом один на одного і постійні магніти, прийшов до висновку про електродинамічну природу магнетизму. У зв'язку з цим він вперше запропонував розділити все вчення про електричні і магнітні явища на дві частини: електростатику і електродинаміку. Ідеї Ампера були дуже холодно сприйняті його сучасниками. Визнання їх означало відмову від загальноприйнятих у той час уявлень про особливу магнітну рідину, що дозволяла пояснювати взаємодію постійних магнітів без введення незрозумілих в той час молекулярних струмів Ампера. Для пояснення дії провідника зі струмом на магнітну стрілку прихильниками уявлень про магнітну рідину (Біо та інші) була висловлена гіпотеза про те, що під дією струму нейтральна магнітна рідина у провіднику поляризується і він набуває властивості магніту.

У 1824р. французький фізик Д.Араго виявив, що коливання вільно підвішеної магнітної стрілки затухають значно швидше, якщо над стрілкою або під нею знаходиться мідна пластина. У 1825р., змінивши цей дослід, він виявив ще більш незвичайне явище: при швидкому обертанні мідної пластинки розміщена під нею магнітна стрілка починає обертатися в тому самому напрямі. Здавалося, що таку поведінку стрілки можна пояснити поляризацією магнітної рідини у

пластинці, тобто намагнічуванням її через вплив, яке аналогічне відомому з електростатики зарядженню через вплив. Але в такому випадку магнітна стрілка повинна притягуватися як до нерухомої, так і рухомої пластинки. Досліди Араго, які були повторені іншими дослідниками, показали, що ні до нерухомої, ні до рухомої мідної пластинки стрілка не притягується. Тим самим рідинній теорії магнетизму був нанесений удар. Для її врятування Араго запропонував існування в металах особливого "магнетизму обертання".

Правильне пояснення дослідів Араго було дано через декілька років видатним англійським фізиком М.Фарадеєм, який відкрив явище електромагнітної індукції. Фарадей був прихильником теорії Ампера. Він вважав, що між електричними і магнітними явищами існує тісний взаємозв'язок. Ампер, Біо та інші з'ясували лише один бік цього взаємозв'язку, а саме магнітну дію струму. Фарадей вважав за необхідне досліджувати електричну дію магнітного поля. При цьому Фарадей виходив з наступного: якщо електричні і магнітні явища взаємозв'язані і навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле, то природно очікувати, що повинно мати місце обернене явище – виникнення електричного струму під дією магнітного поля. Але перші досліди з провідником, вміщеним у магнітне поле постійного струму, не дали позитивних результатів. Тільки у 1831р., після десяти років наполегливих пошуків, Фарадею вдалося вирішити задачу, яку він поставив перед собою. Він здійснив дослід з двома котушками, розміщеними поруч. Через одну з них проходив струм, а друга котушка була з'єднана з гальванометром. При замиканні і розмиканні кола першої котушки у другій виникав струм.

ІНДУКЦІЙНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Відомо, що на нерухомі електричні заряди може діяти тільки електричне поле. Якщо в нерухомому провіднику (навколо якого змінюється магнітне поле) виник електричний струм, то це означає, що на вільні електрони, які є в провіднику, подіяло електричне поле. У системі відліку, пов'язаної з нерухомим провідником, є тільки змінне магнітне поле. Отже, можна припустити, що змінне магнітне поле викликає появу електричного поля. Це поле називається індукційним або вихровим електричним полем.

На існування вихрового електричного поля було вказано Дж.Максвелом. Вчений детально проаналізував явище електромагнітної індукції і зробив висновок: причина появи ЕРС індукції полягає у виникненні вихрового електричного поля.

Індукційне електричне поле має ряд особливостей (відрізняється від поля нерухомих зарядів, поля постійного струму), тому що воно не створюється деяким певним розподілом зарядів, а визначається магнітним полем.

Силова дія індукційного електричного поля на заряди характеризується вектором напруженості \vec{E} . *Енергетичною* характеристикою індукційного поля є ЕРС індукції ξ_i .

ЕРС індукції розвивається у всьому колі в цілому, тобто у всіх точках ко-

ла, де змінюється потік магнітної індукції. ЕРС хімічного елемента, ЕРС термопари виникають тільки на певній ділянці (в акумулятора, наприклад, ЕРС виникає у пограничному шарі між металом і електролітом). Особливість ЕРС індукції, як показує дослід, – незалежність її від роду речовини провідника, від його температури. ЕРС індукції визначається самим магнітним полем. Провідники ж у явищі електромагнітної індукції відіграють другорядну роль, є свого роду приладами, що виявляють електромагнітне поле.

При зміні магнітного потоку завжди виникає вихрове електричне поле, енергетичною характеристикою якого є ЕРС індукції. Індукційний струм виникає за умови наявності провідного контуру. Якщо контур не провідний (наприклад, умовно проведений у повітрі), то можна говорити лише про ЕРС індукції.

Сторонніми силами є сили вихрового електричного поля.

Індукційне електричне поле не потенціальне. Отже, для його характеристики не можна застосовувати поняття потенціалу, а також поняття потенціальної енергії.

Лінії магнітної індукції вихрового електричного поля замкнені. Вони являють собою кола, що охоплюють магнітний потік, який змінюється, подібно лініям індукції магнітного поля прямолінійного провідника зі струмом.

Для індукційного електричного поля інша, ніж для електростатичного поля залежність напруженості від відстані r : $E_{\text{кул}} \sim \frac{1}{r^2}$, $E_{\text{інд}} \sim \frac{1}{r}$.

Дякуючи цьому індукційне електричне поле виявляється в просторі далі від джерела збудження, ніж електростатичне поле.

Індукційне електричне поле відрізняється за властивостями і структурою від електростатичного, але, в основному, вони схожі – головною властивістю індукційного і електростатичного полів є їх дія на заряд.

ЯВИЩЕ САМОІНДУКЦІЇ. ІНДУКТИВНІСТЬ.

1. *Самоіндукція* – виникнення ЕРС індукції в провідному контурі при зміні в ньому сили струму.

Самоіндукція – частковий випадок електромагнітної індукції. При зміні струму в контурі змінюється потік магнітної індукції через поверхню, обмежену цим контуром, внаслідок чого в ньому збуджується ЕРС самоіндукції.

Напрямок ЕРС самоіндукції визначається правилом Ленца, тобто при збільшенні в колі сили струму ЕРС самоіндукції перешкоджає його зростанню, а при зменшенні струму – його зменшенню. Таким чином, самоіндукція подібна явищу інерції в механіці.

ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни сили струму й індуктивності контуру.

В електричному колі, яке містить постійну ЕРС, при замиканні кола сила струму за рахунок ЕРС самоіндукції встановлюється не миттєво, а через деякий проміжок часу; при виключенні джерела струм не припиняється миттєво. ЕРС самоіндукції, що виникає при розмиканні кола може у багато разів перевищити ЕРС джерела.

Явище самоіндукції відіграє важливу роль в електротехніці і радіотехніці.

2. *Індуктивність* – величина, яка характеризує магнітні властивості електричного кола.

Струм, що проходить у провідному контурі, створює в оточуючому просторі магнітне поле, причому магнітний потік Φ , який пронизує контур, прямо пропорційний силі струму: $\Phi = LI$. Коефіцієнт пропорційності L називається індуктивністю або коефіцієнтом самоіндукції контуру.

Індуктивність залежить від розмірів і форми контуру, а також від магнітної проникності оточуючого середовища. В СІ вимірюється в генрі (Гн).

Через індуктивність виражається ЕРС самоіндукції: $\xi = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Індуктивність визначає енергію W магнітного поля струму: $W = \frac{LI^2}{2}$.

Якщо провести аналогію між електричними і механічними явищами, то магнітну енергію слід порівняти з кінетичною енергією тіла $\frac{mv^2}{2}$ (m – маса тіла, v – його швидкість), при цьому індуктивність буде грати роль маси, а струм – швидкості. Таким чином, індуктивність визначає інерційні властивості струму.

Для збільшення індуктивності застосовують котушки індуктивності із залізним осердям.

ДОДАТОК

БАЗОВІ СТРУКТУРИ ЦИКЛІВ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ З ВВЕДЕННЯ ОКРЕМИХ ПОНЯТЬ "ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ"

Закон Кулона.

Учні повинні знати:

1. Два нерухомі точкові електричні заряди у вакуумі взаємодіють із силою, прямо пропорційною добутку цих зарядів і обернено пропорційною квадрату відстані між ними: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$.

Цей закон експериментально відкрив французький фізик Ш.Кулон, тому закон названо його ім'ям.

2. k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від вибору системи одиниць.

В СІ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$, де ϵ_0 – електрична стала.

3. Сила взаємодії зарядів прикладена до кожного з цих зарядів і напрямлена вздовж прямої, яка з'єднує ці заряди.

(4. За наявності діелектрика, в якому знаходяться заряди, закон Кулона записується так: $F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$ або $F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$, де ϵ – діелектрична проникність середовища).

I. Висування навчальної задачі.

Повторюється введене раніше поняття "Електричний заряд".

Задача: Про наявність у тіл електричного заряду свідчить наявність сили, з якою одне з цих тіл діє на інше. Як обчислити силу взаємодії заряджених тіл?

II. Прогнозування наступної діяльності.

Що треба з'ясувати для вирішення поставленої задачі?

Відповідь:

1. Як і про будь-яку силу треба знати: точку її прикладання, напрям, спосіб визначення значення сили.

2. Треба з'ясувати, як залежить сила від значень зарядів, що взаємодіють, і від відстані між ними.

III. Введення істотних ознак поняття "Закон Кулона".

1. За допомогою якої дослідної установки досліджувалась взаємодія електрично заряджених тіл?

Розповідається про крутильні терези, їх будову і дію. Пояснюється вибір маленьких за розмірами кульок, які взаємодіють при наданні їм електричних зарядів. Підкреслюється, що сила їх взаємодії визначалася за умови нерухомості кульок. Вводиться термін "точковий заряд".

2. Як залежить сила взаємодії заряджених тіл від значення їх зарядів?

Розповідається про досліди.

Відповідь: сила взаємодії між двома нерухомими точковими зарядами прямо пропорційна значенням цих зарядів.

3. Як залежить сила взаємодії заряджених тіл від відстані між ними?

Розповідається про досліди.

Відповідь: сила взаємодії між двома нерухомими точковими зарядами обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

4. Як математично записати результати дослідів?

Узагальнюються результати дослідів.

Відповідь: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, де k – коефіцієнт пропорційності. В СІ

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

5. Як напрямлена сила? Яка точка її прикладання?

Відповідь: сила напрямлена вздовж прямої, що з'єднує точкові заряди, і прикладена до кожного з них.

IV. Систематизація істотних ознак поняття.

Формулюється блок істотних ознак поняття "Закон Кулона". Розповідається про спосіб визначення сили взаємодії заряджених макроскопічних тіл.

V. Демонстрація способу розв'язування навчальної задачі.

Задача. Знайти силу, з якою діють два точкових заряди $q_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл і $q_2 = -2 \cdot 10^{-6}$ Кл, що знаходяться у двох вершинах рівнобічного трикутника зі стороною $a = 0,1$ м, на третій заряд $q_3 = 10^{-6}$ Кл, розміщений у третій вершині цього трикутника.

VI. Розв'язування задач.

Напруженість електричного поля.

Учні повинні знати:

1. Напруженістю електричного поля в даній його точці називають фізичну величину, що чисельно дорівнює відношенню сили, з якою поле діє на точковий заряд, уміщений в цю точку, до цього заряду: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$.

2. Напруженість електричного поля – векторна величина. Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, з якою поле діє на позитивний заряд, уміщений в дану точку поля.

3. Напруженість електричного поля точкового заряду на відстані R від нього: $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^2}$.

4. Якщо $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$ – напруженості полів, створюваних окремими зарядженими тілами, то напруженість \vec{E} результуючого поля в тій самій точці:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

Цей висновок називають принципом незалежності дії електричних полів, або принципом суперпозиції полів.

I. Висування навчальної задачі.

Повторюється введене раніше поняття "Електростатичне поле".

Задача: Головна властивість електричного поля – дія з деякою силою на внесені в нього заряди. Як визначити цю силу?

II. Прогнозування наступної діяльності.

Що треба з'ясувати для вирішення поставленої задачі?

Відповідь: враховуючи те, що мова йде про дію поля на вміщене в нього заряджене тіло з певною силою, треба ввести фізичну величину, що є кількісною характеристикою даної здатності поля. Отже, треба з'ясувати такі ознаки цієї фізичної величини: її визначальну формулу, векторний або скалярний характер, одиницю вимірювання.

III. Введення істотних ознак поняття "Напруженість електричного поля".

1. Яка фізична величина є силовою характеристикою електричного поля? Вводиться поняття "пробний електричний заряд".

Відповідь: силовою характеристикою поля є фізична величина, яка чисельно дорівнює відношенню сили, що діє на вміщений в нього пробний заряд, до значення цього заряду, адже це відношення не залежить від значення пробного заряду. Дана величина називається напруженістю електричного поля, позначається літерою E : $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$.

2. Як видно, напруженість електричного поля векторна величина. Як напрямлений вектор \vec{E} ?

Відповідь: напрям вектора \vec{E} збігається з напрямом сили, з якою поле діє на позитивне заряджене тіло, що вміщене у дану точку поля.

3. В яких одиницях вимірюється напруженість електричного поля?

Пригадується спосіб визначення похідної одиниці вимірювання фізичної величини з визначальної формули.

Відповідь: напруженість в СІ вимірюється в $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$.

4. Як визначити напруженість результуючого електричного поля, створеного кількома точковими зарядами?

Відповідь: Якщо $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$ – напруженості полів, створених точковими зарядами $q_1, q_2 \dots q_n$, то напруженість \vec{E} результуючого поля дорівнює векторній сумі вказаних напруженостей:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

IV. Систематизація істотних ознак поняття.

Формулюється блок істотних ознак поняття "напруженість електричного поля".

V. Демонстрація способу розв'язування навчальної задачі.

Задача. У двох сусідніх вершинах квадрату зі стороною $a = 1\text{ м}$ містяться точкові заряди $q_1 = 10^{-6}\text{ Кл}$ і $q_2 = -10^{-6}\text{ Кл}$. Визначити напруженість поля в останніх вершинах квадрата. Яка сила діятиме на точковий заряд $q_3 = 2 \cdot 10^{-6}\text{ Кл}$, якщо його помістити у зазначені вершини квадрату?

VI. Графічне зображення електричних полів.

Розв'язування задач.

Потенціал. Різниця потенціалів.

Учні повинні знати:

1. Робота електричного поля при переміщенні заряду з однієї точки у другу не залежить від форми шляху, а залежить від положення цих точок. Отже, робота сил електричного поля з переміщення заряду замкненим контуром дорівнює нулеві.

2. Робота сил електричного поля під час переміщення в ньому заряду йде на зміну потенціальної енергії зарядженого тіла.

3. Відношення потенціальної енергії зарядженого тіла, вміщеного в дану точку електростатичного поля, до значення заряду приймається за енергетичну характеристику поля, яку називають потенціалом поля в даній точці: $\varphi = \frac{П}{q}$.

4. Величина, що дорівнює відношенню роботи поля під час переміщення заряду з однієї точки в іншу, до значення його заряду, називається різницею потенціалів між цими точками або напругою: $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} = \frac{П_1}{q} - \frac{П_2}{q}$.

5. В СІ потенціал і напруга вимірюються в вольтах (В): $1В = 1 \frac{Дж}{Кл}$.

6. Між напругою і напруженістю однорідного електростатичного поля існує зв'язок: $E = \frac{U}{d}$, де d – відстань між точками поля вздовж силової лінії, для яких визначена напруга U .

Вектор напруженості електричного поля напрямлений у бік зменшення потенціалу.

7. Електричне поле графічно зображується екіпотенціальними поверхнями, які перпендикулярні до ліній напруженості.

І. Висування навчальної задачі.

Повторюється введені раніше поняття "Електричне поле" і "Напруженість електричного поля".

В однорідному електричному полі напруженістю \vec{E} під час переміщення в ньому електрично зарядженого тіла, значення заряду якого q , виконується робота. Дану роботу можна обчислити за формулою $A = F \cdot d \cdot \cos\alpha$, де $F = qE$.

Виникає задача: Як можна визначити роботу, яку виконують сили елект-

ростатичного поля з переміщення в ньому зарядженого тіла, не використовуючи значення діючої сили?

II. Прогнозування наступної діяльності.

Що треба з'ясувати для вирішення поставленої задачі?

Доводиться, що робота сил електростатичного поля з переміщення в ньому зарядженого тіла не залежить від форми траєкторії руху тіла, а визначається тільки початковим і кінцевим положенням даного тіла.

Водночас, робота сил електростатичного поля йде на зменшення потенціальної енергії зарядженого тіла, що переміщується. Це аналогічно роботі гравітаційних сил (сили тяжіння).

Отже, для вирішення поставленої задачі треба ввести фізичну величину, яка є енергетичною характеристикою електростатичного поля, тобто яка характеризує здатність поля виконувати роботу з переміщення в ньому електрично зарядженого тіла. У зв'язку з цим треба з'ясувати: її визначальну формулу, одиницю вимірювання, векторний чи скалярний характер даної величини.

III. Введення істотних ознак поняття "Потенціал. Різниця потенціалів".

1. Яка фізична величина є енергетичною характеристикою поля?

Встановлюється незалежність відношення $\frac{A}{q}$ від величини пробного заряду q .

Відповідь: відношення потенціальної енергії зарядженого тіла, вміщеного у дану точку поля, до значення його заряду називається потенціалом електростатичного поля.

Позначається потенціал літерою φ . В СІ вимірюється у вольтах $1\text{В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$.

2. Враховуючи, що робота поля дорівнює зміні потенціальної енергії зарядженого тіла, яке переміщується в цьому полі, і визначення потенціалу, можна записати: $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} - \frac{A_2}{q}$.

Який зміст цієї величини?

Розповідається про відносність значення потенціалу (залежність від вибору точки, в якій $\varphi = 0$). Показується абсолютний характер $(\varphi_1 - \varphi_2)$. Дається визначення різниці потенціалів і потенціалу (приймаючи, що $\varphi = 0$ у нескінченності).

Висновок: Величина, що дорівнює відношенню роботи поля під час переміщення заряду з однієї точки в іншу, до значення заряду, називається різницею потенціалів або напругою: $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} - \frac{A_2}{q}$. В СІ вимірюється в вольтах.

3. Якою є фізична величина – потенціал електростатичного поля – скалярною чи векторною величиною?

Відповідь: Потенціал – скалярна величина. Потенціал результуючого поля, створеного кількома зарядженими тілами дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів окремих полів у даній точці простору.

4. Який зв'язок між напругою і напруженістю електростатичного поля?

Відповідь: $E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta d} = \frac{U}{\Delta d}$, де Δd – відстань між точками однорідного елект-

ростатичного поля з потенціалами φ_1 і φ_2 .

Вектор \vec{E} напрямлений у бік зменшення потенціалу.

5. Як графічно зобразити поле, користуючись поняттям "потенціал"?

Вводиться поняття "еквіпотенціальна поверхня".

IV. Систематизація істотних ознак поняття.

Формулюється блок істотних ознак поняття "Потенціал. Різниця потенціалів".

V. Демонстрація способу розв'язування навчальної задачі.

Задача. У двох вершинах рівнобічного трикутника зі стороною $a = 0,2\text{м}$ знаходяться точкові заряди $q_1 = 0,1 \cdot 10^{-6}\text{Кл}$ і $q_2 = 0,2 \cdot 10^{-6}\text{Кл}$. Визначити роботу, яку виконують сили електростатичного поля, створеного цими зарядами, під час переміщення заряду $q_3 = 10^{-6}\text{Кл}$ з третьої вершини трикутника в точку, розміщену на стороні трикутника посередині між зарядами q_1 і q_2 .

Електроємність. Конденсатор.

Учні повинні знати:

1. Електроємністю провідника називають величину, яка вимірюється відношенням заряду провідника q до його потенціалу φ : $C = \frac{q}{\varphi}$.

2. Електроємність провідника не залежить від значення заряду і визначається розмірами і формою провідника й електричними властивостями навколишнього середовища.

3. Одиницею електроємності в СІ є $\frac{\text{Кл}}{\text{В}}$. Цю одиницю названо фарад (Ф):

$$1\text{Ф} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}}.$$

4. Найпростіший конденсатор складається з двох провідників (обкладок), розділених ізолятором (діелектриком).

5. Під електроємністю конденсатора розуміють фізичну величину, що дорівнює відношенню заряду Q , нагромадженого в конденсаторі, до різниці потенціалів ($\varphi_1 - \varphi_2$) між його обкладками: $C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2}$.

6. Електроємність плоского конденсатора прямо пропорційна робочій площі пластин і відносній діелектричній проникності діелектрика й обернено пропорційна відстані між пластинами: $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$.

7. При паралельному з'єднанні конденсаторів електроємність усієї батареї визначається з виразу: $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$.

При послідовному з'єднанні конденсаторів електроємність усієї батареї визначається з виразу: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$.

I. Висування навчальної задачі.

Повторюються відомості про провідник, уміщений в електричне поле.

Якщо відокремленому провіднику, тобто провіднику, віддаленому від інших тіл, надати електричного заряду, то цей заряд розміститься на зовнішній поверхні провідника. Ця поверхня буде екіпотенціальною, тобто має певний потенціал. Провідники відрізняються одні від одних тим, що при однаковому потенціалі вони мають різні за значенням заряди. Отже, провідники мають властивість накопичувати надані їм заряди.

Виникає задача: Як знайти заряд провідника, якщо відомий його потенціал? Як збільшити цей заряд, не збільшуючи потенціалу провідників?

II. Прогнозування наступної діяльності.

Що треба з'ясувати для вирішення поставленої задачі?

Якщо провідники мають спільну властивість й одночасно відрізняються одні від одних інтенсивністю прояву цієї властивості, то вводиться фізична величина – кількісна характеристика даної властивості.

Отже, для вирішення поставленої задачі треба ввести фізичну величину – характеристику провідників, від якої залежить значення заряду провідників, що мають даний потенціал.

Тому треба з'ясувати: зміст цієї фізичної величини, визначальну формулу, одиницю вимірювання.

III. Введення істотних ознак поняття "Електроємність. Конденсатор".

1. Яка фізична величина характеризує зазначену властивість провідників?

Виходячи з незалежності відношення заряду провідника до його потенціалу від наданого провіднику заряду, приходять до висновку: фізична величина, яка чисельно дорівнює відношенню заряду провідника до його потенціалу, називається електроємністю $C = \frac{q}{\varphi}$.

2. В яких одиницях вимірюється електроємність?

Пригадуючи спосіб визначення похідної одиниці вимірювання з визначальної формули, приходимо до висновку: в СІ електроємність вимірюється в $\frac{\text{Кл}}{\text{В}}$.

Цю одиницю електроємності названо фарад (Ф): $1\text{Ф} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}}$.

3. Електроємність відокремленого провідника залежить від наявності оточуючих його тіл. Як запобігти цієї залежності?

Вводиться поняття конденсатора та його видів.

4. Як обчислити електроємність конденсаторів?

Дається визначення електроємності конденсатора і формула електроємності плоского конденсатора $C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2}$; $C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$.

5. Які способи з'єднання конденсаторів у батареї?

Вводяться поняття про послідовне і паралельне з'єднання конденсаторів.

IV. Систематизація істотних ознак поняття.

Формулюється блок істотних ознак поняття "Електроємність. Конденсатори".

V. Демонстрація способу розв'язування навчальної задачі.

Задача. Ємність конденсатора 58мкФ. Який заряд він накопичить при його підключенні до полюсів джерела постійної напруги 50В?

VI. Розв'язування задач.

Закон Ома для повного кола.

Учні повинні знати:

1. Повне або замкнуте електричне коло складається з двох частин: так званої внутрішньої, або джерела ЕРС, і зовнішньої, яка з'єднує полюси джерела поза ним.

2. Закон Ома для повного (замкнутого) кола: сила струму в замкнутому колі прямо пропорційна ЕРС джерела й обернено пропорційна сумі зовнішнього і внутрішнього опорів: $I = \frac{\xi}{R+r}$.

3. Сила струму під час короткого замикання визначається не тільки ЕРС, а й його внутрішнім опором джерела: $I_k = \frac{\xi}{r}$

I. Висування навчальної задачі.

Повторюється раніше введене поняття ЕРС.

Задача: ЕРС дорівнює різниці потенціалів на полюсах розімкненого джерела струму. Як експериментально визначити ЕРС джерела, користуючись амперметром і набором резисторів?

II. Прогнозування наступної діяльності.

Що треба з'ясувати для вирішення поставленої задачі?

Відповідь: Треба з'ясувати зв'язок між силою струму в колі і ЕРС.

III. Введення істотних ознак поняття "Закон Ома для повного кола".

1. Які складові повного електричного кола?

Дається поняття про зовнішню і внутрішню частину кола.

2. Який зв'язок між силою струму, ЕРС і зовнішнім опором у повному колі?

Виходячи з закону збереження енергії отримують закон Ома для повного кола.

3. Як визначити силу струму короткого замикання?

Із закону Ома для повного кола отримують: $I_k = \frac{\xi}{r}$.

IV. Систематизація істотних ознак поняття.

Формулюється блок істотних ознак поняття "Закон Ома для повного кола".

V. Демонстрація способу розв'язування навчальної задачі.

Задача. При підключенні до батареї гальванічних елементів резистора опором 16 Ом сила струму в колі була 1 А, а при підключенні резистора опором 8 Ом сила струму стала 1,8 А. Знайти ЕРС джерела.

VI. Розв'язування задач.

Сила Лоренца.

Учні повинні знати:

1. Сила, що діє на заряджену частинку, яка рухається в магнітному полі, пропорційна зарядові частинки, швидкості її переміщення та індукції магнітного поля: $F_L = qvB \sin \alpha$, де α – кут між векторами магнітної індукції і швидкості

руху частинки. Ця сила називається силою Лоренца.

2. Якщо заряджена частинка влітає в однорідне магнітне поле так, що її швидкість руху перпендикулярна до силових ліній, то вона описуватиме коло.

3. Напрямок сили Лоренца можна визначити, скориставшись правилом лівої руки (треба лише завжди враховувати знак заряду частинки).

4. Сила Лоренца роботу не виконує, отже не змінює кінетичну енергію частинки.

I. Висування навчальної задачі.

Повторюється раніше введене поняття про магнітне поле.

Задача: Головною властивістю магнітного поля є його дія з певною силою на рухоми заряджену частинку. Як проявляється дія магнітного поля на рухоми частинку?

II. Прогнозування наступної діяльності.

Що треба з'ясувати для вирішення поставленої задачі?

Відповідь: Для характеристики сили, з якою магнітне поле діє на рухоми заряджену частинку, треба знати: формулу, з якої визначається значення сили, точка її прикладання, напрям, особливості дії даної сили.

III. Введення істотних ознак поняття "Сила Лоренца".

1. Як знайти числове значення сили, з якою магнітне поле діє на рухоми частинку?

Повторюється сила Ампера і вводиться формула $F_{\text{л}} = qvB\sin\alpha$.

2. Як визначити напрям сили Лоренца?

Повторюється правило лівої руки і застосовується до сили Лоренца.

3. Які особливості дії сили Лоренца?

Відповідь: Частинка, що влітає в магнітне поле перпендикулярно до силових ліній, рухається по колу.

Сила Лоренца роботу не виконує. Швидкість руху частинки по колу не змінюється за величиною.

IV. Систематизація істотних ознак поняття.

Формулюється блок істотних ознак поняття "Сила Лоренца".

V. Демонстрація способу розв'язування навчальної задачі.

Задача. Визначити напрям швидкості руху електрона через $2,25 \cdot 10^{-9}$ с після того, як він влетів у магнітне поле з індукцією 4 мТл перпендикулярно до силових ліній. Силові лінії розміщені горизонтально.

VI. Розв'язування задач.

ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

Розв'язування практичних задач у циклах навчального процесу з вивчення понять і законів електродинаміки

ЕЛЕКТРОСТАТИКА

ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

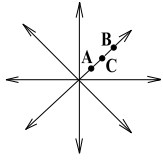
Студент повинен уміти розв'язувати задачі типу:

1. Заряди 90 і 10 нКл розміщені на відстані 4 см один від одного. Де треба розмістити третій заряд, щоб він перебував у рівновазі?

(Відповіді: На відстані 1 см від меншого і 3 см від більшого заряду)

2. На двох однакових за довжиною нитках, закріплених в одній точці, підвішені дві кульки. Порівняти кути відхилення ниток від вертикалі, якщо: а) кульки, маючи однакові маси, заряджені однойменно й заряд першої кульки більше заряду другої; б) заряди кульок однакові, а маса першої більша маси другої кульки.

(Відповідь: а) однакові; б) кут відхилення другої більший)



3. Точки А і В лежать на одній лінії напруженості електростатичного поля точкового заряду. Напруженість поля в точці А дорівнює E_1 , в точці В – E_2 . Визначити напруженість у точці С, яка лежить посередині між точками А і В.

$$\text{(Відповідь: } E_c = \frac{4E_1E_2}{(\sqrt{E_1} + \sqrt{E_2})^2} \text{)}$$

4. Чотири однойменних заряди q розміщені у вершинах квадрата зі стороною a . Якою буде напруженість поля на відстані $2a$ від центру квадрата: 1) на продовженні діагоналі; 2) на прямій, що проходить через центр квадрата паралельно сторонам?

$$\text{(Відповідь: } E_1 = \frac{1,15q}{4\pi\epsilon_0 a^2}; E_2 = \frac{1,06q}{4\pi\epsilon_0 a^2} \text{)}$$

5. Протон (маса m , заряд e) рухається з нескінченності, де його швидкість була v , до нерухомої α -частинки (маса $4m$, заряд $2e$). Знайти найменшу відстань між частинками у напрямі руху.

$$\text{(Відповідь: } r = \frac{5e^2}{4\pi\epsilon_0 m v^2} \text{)}$$

6. З похилої площини, яка утворює кут α з горизонтом, зісковзує з висоти h невелике тіло, заряджене негативним зарядом $-q$. У точці перетинання вертикалі, проведеної через початкове положення тіла, з основою знаходиться заряд $+q$. Визначити швидкість, з якою тіло досягає основи похилої площини. Тертям знехтувати. Маса тіла m .

$$\text{(Відповідь: } v = \sqrt{2 \left[gh - \frac{q^2}{mh} (1 - t g \alpha) \right]} \text{)}$$

7. Всередині тонкостінної металевої сфери радіусом $R = 20\text{см}$ концентрично розміщена металева куля радіусом $r = 10\text{см}$. Куля через отвір у сфері з'єднана з Землею за допомогою дуже тонкого довгого провідника. На зовнішній сфері розміщують заряд $Q = 10^{-8}\text{Кл}$. Визначити потенціал φ цієї сфери.

$$\text{(Відповідь: } \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} - \frac{Q(R-r)}{R^2} \text{)}$$

8. Електрон влітає паралельно пластинам у плоский конденсатор, поле в якому $E = 60 \frac{\text{В}}{\text{см}}$. Знайти зміну модуля швидкості електрона до моменту вильоту його з конденсатора, якщо початкова швидкість $v_0 = 2 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а довжина пластини конденсатора $l = 6\text{см}$.

$$\text{(Відповідь: } v_1 - v_2 \approx \frac{(eE)^{\frac{2}{3}}}{2m^2 v_0^{\frac{2}{3}}} \text{)}$$

9. Між пластинами зарядженого плоского конденсатора помістили діелектрик з діелектричною проникністю ϵ , так, що він повністю заповнив простір між половинами площ пластин. У скільки разів змінилася ємність конденсатора, заряд на пластинах і напруга між ними?

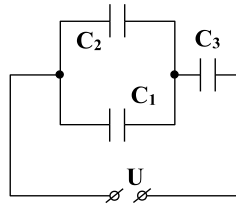
$$\text{(Відповідь: збільшилася в } \frac{\epsilon+1}{2} \text{ разів; не змінився; зменшилася в } \frac{\epsilon+1}{2} \text{ разів)}$$

10. Конденсатор, заряджений до напруги $U_1 = 250\text{В}$, з'єднують паралельно з конденсатором такої самої ємності, але зарядженого до напруги $U_2 = 150\text{В}$. Яка напруга встановиться між обкладками? Розглянути два випад-

ки: з'єднання пластин однакової і різної полярності.

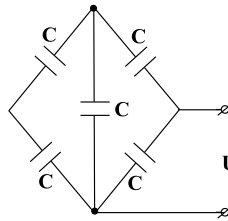
(Відповідь: а) $U = \frac{1}{2}(U_1 + U_2)$; б) $U = \frac{1}{2}(U_1 - U_2)$)

11. Як зміняться заряд і різниця потенціалів обкладок конденсатора C_3 при пробі конденсатора C_2 ? У скільки разів?

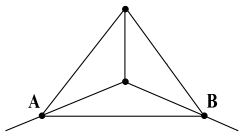


(Відповідь: збільшиться в $\frac{C_1+C_2+C_3}{C_1+C_2}$ разів)

12. Знайти ємність батареї конденсаторів



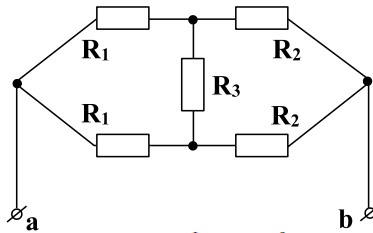
(Відповідь: C)



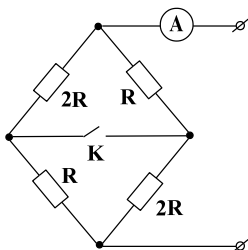
13. Знайти загальний опір контуру, складеного з дротин, що мають однакові опори R . Контур під'єднаний до електричного кола в точках А і В.

(Відповідь: $R = 0,50\Omega$)

14. Різниця потенціалів між точками а і б кола дорівнює U . Визначити опір кола.



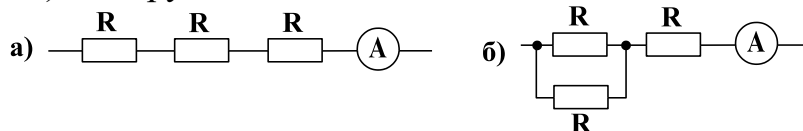
(Відповідь: $R = \frac{(R_1+R_2)R_3+2R_1R_2}{R_1+R_2+2R_3}$)



15. При замкненому вимикачі К сила струму, що йде через амперметр, дорівнює $0,45\text{A}$. Який струм буде проходити через амперметр при розмиканні вимикача? Напруга на полюсах стала.

(Відповідь: $I = \frac{4}{3} \frac{RI_1}{2} = 0,4\text{A}$)

16. У скільки разів зміняться покази амперметра, якщо від схеми а) перейти до схеми б)? Напруга, що подана на кінці кола незмінна.

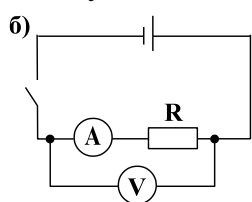
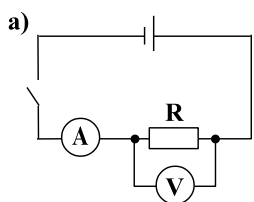


(Відповідь: збільшиться у 2 рази)

17. На шкалі гальванометра вказано: опір $2,30\text{М}$ і напруга, яку треба подати, щоб стрілка відхилилася на одну поділку $1,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{В}}{\text{поділку}}$. Уся шкала має 10 поділок. Знайти, яким повинен бути опір додаткового резистора, щоб прилад можна було використовувати як вольтметр для вимірювання напруги 5В; 15В.

(Відповідь: 8200Ом; 24600Ом)

18. Якщо замкнути коло у схемі а), амперметр покаже силу струму



$I_1 = 1,06\text{А}$, а вольтметр – напругу $U_1 = 59,6\text{В}$. Якщо замкнути коло у схемі б), складене з тих самих приладів, то амперметр покаже струм $I_2 = 0,94\text{А}$, а вольтметр – напругу $U_2 = 60\text{В}$. Визначити опір резистора

R , вважаючи напругу на затискачах батареї сталою.

(Відповідь: $R = \frac{U_2}{I_2} - \frac{U_2 - U_1}{I_1} = 63,40\text{Ом}$)

19. Паралельно амперметру увімкнули шунт – резистор з електричним опором $R_{\text{ш}}$, який у n разів менший за внутрішній опір R_a приладу. У скільки разів при цьому зміняться покази амперметра?

(Відповідь: $\frac{I}{I_0} = I + n$)

20. Описати спосіб (логіку) розв’язування навчальних задач в циклах навчального процесу з введення таких понять:

- Закон Кулона;
- Напруженість електричного поля;
- Потенціал. Різниця потенціалів.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

Розв’язування задач із рівноваги заряджених тіл

Підготовка до заняття

1. Пригадати зміст понять: електричний заряд, закон Кулона, напруженість електричного поля, принцип суперпозиції полів. [, с.].

2. Ознайомитися з методичними рекомендаціями щодо розв’язування задач на рівновагу тіл.

Кількісні задачі, в яких розглядається взаємодія точкових електричних зарядів, що визначається законом Кулона, а також дія на них електростатичного поля з силою $\vec{F} = q\vec{E}$, можна поділити на такі групи: задачі із застосуванням закону Кулона і визначення однієї з фізичних величин, що входять до формули закону; задачі, в яких розраховується напруженість поля, створеного системою точкових зарядів, а також визначення однієї з фізичних величин, що входять до

формули напруженості поля; задачі, в яких розглядаються рівновага і рух тіл, що мають електричний заряд.

Перші дві групи зазначених задач, з точки зору їх фізичного змісту, умовно можна вважати вправами, спрямованими на засвоєння відповідних формул, різноманітність яким надають або фізичні величини, що визначаються з цих формул, або необхідність виконання різних систем математичних дій.

Третя група задач передбачає: розгляд істотних ознак понять електричного заряду і напруженості поля у різних практичних ситуаціях; повторення і розвиток понять механіки та відповідних систем дій; розширення кола ситуацій, в яких застосовуються закони класичної механіки; включення зазначених понять електростатики у загальну систему фізичних знань.

Закони механіки застосовуються не тільки під час вивчення закону Кулона й напруженості електричного поля, а й інших понять електростатики.

Під час практичних занять з механіки були розглянуті й використані методичні рекомендації щодо розв'язування задач з кінематики, динаміки, законів збереження імпульсу та енергії. Методичні рекомендації щодо розв'язування задач з рівноваги тіл не розглядалися. Тому спочатку розглядається загальний підхід до розв'язування задач з рівноваги тіл, а потім його застосування до рівноваги тіл, що мають електричний заряд.

Якщо розглядається рівновага тіл за відсутністю обертання, то доцільно виконувати таку систему дій:

1. Після вивчення умови задачі – з'ясування того, що відомо і що треба знайти, умовного запису з'ясованого, встановлення її відношення до задач даного типу, визначити, рівновага якого тіла (або системи тіл) розглядається.

2. Виконати малюнок, на якому зобразити: тіло, рівновага якого вивчається; тіла, з якими тіло взаємодіє (крім Землі); всі сили, що діють на це тіло.

3. Записати умову рівноваги тіла у векторній формі:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N = 0.$$

4. Проводяться осі координат і записується умова рівноваги тіла в проекціях сил на ці осі:
$$\begin{cases} F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{Nx} = 0 \\ F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{Ny} = 0 \end{cases}$$

5. Записуються додаткові умови.

6. Розв'язується отримана система рівнянь і визначаються шукані величини.

Поради

1. Із тіл, що взаємодіють між собою й перебувають у стані спокою, треба розглядати рівновагу того тіла, до якого прикладені сили, включаючи відомі з умови задачі, і сили, що треба визначити.

2. Якщо на тіло з боку інших тіл діють сили пружності, то треба враховувати те, як деформовані ці тіла – розтягнуті чи стиснуті. Сила пружності, що виникає у деформованому тілі, діє на всі його частини й одночасно на тіло, яке заважає деформованому тілу відновити свою початкову форму. Сила пружності напрямлена проти напрямку зміщення частинок деформованого тіла.

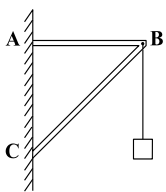
3. Точку прикладання сили у твердому тілі можна перенести вздовж лінії дії сили не порушуючи рівноваги даного тіла. У багатьох задачах зручно пере-

носити точки прикладання сил, що діють на тверде тіло або систему твердих тіл, які можна розглядати як одне тіло, розміщуючи їх в одній точці – точці перетинання ліній дії цих сил. Наприклад, підвішене тіло і з'єднане з ним кріплення можна розглядати як одне тіло.

4. Осі координат треба проводити так, щоб можна було скористатися при визначенні проєкцій сил кутами, що задані в умові задачі, або тими, які можна знайти з малюнка, зробленого до цієї задачі.

5. Додатковими умовами можуть бути закони сил або тригонометричні функції, що визначаються з трикутників, які можна виділити з малюнку до умови задачі.

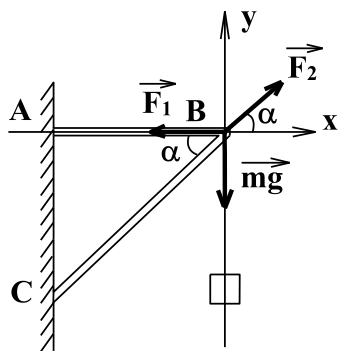
Можлива й інша система дій, яка пов'язана з побудовою силового трикутника для задач, в яких розглядаються кронштейни або інші підвіси.



Задача. На кронштейні підвішене тіло масою m . Визначити сили пружності, що виникають у горизонтальній балці АВ і в підкосі кронштейна ВС. Відомо, що $AB = l_1$, $BC = l_2$.

1^й спосіб

Розглядається рівновага тіла. Тіло і підвіс будемо вважати як одне тіло.



Під дією тіла балка АВ розтягується, а підвіс ВС – стиснутий.

Точки прикладання сил \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , $m\vec{g}$ перенесемо в точку підвісу тіла В.

Умова рівноваги тіла: $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + m\vec{g} = 0$ або в проєкціях сил на осі координат:

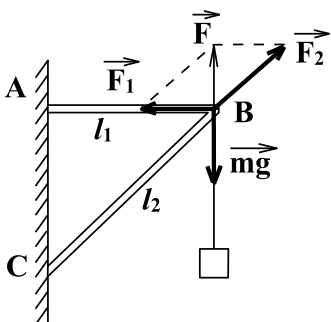
$$OX: F_2 \cos \alpha - F_1 = 0;$$

$$OY: F_2 \sin \alpha - mg = 0.$$

$$\text{Додаткові умови: } \sin \alpha = \frac{\sqrt{l_2^2 - l_1^2}}{l_2}; \quad \cos \alpha = \frac{l_1}{l_2}.$$

$$\text{Отже, } F_2 = \frac{mg}{\sin \alpha} = mg \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2}}, \quad F_1 = F_2 \cos \alpha = mg \frac{l_1}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2}}.$$

2^й спосіб



Рівнодійна сил \vec{F}_1 і \vec{F}_2 дорівнює силі тяжіння: $F = mg$.

Трикутник ABC і трикутник BFF₂ подібні.

Звідси випливає:

$$\frac{F_2}{F} = \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2}}, \quad F_2 = mg \frac{l_2}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2}};$$

$$\frac{F_1}{F} = \frac{l_1}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2}}, \quad F_1 = mg \frac{l_1}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2}}.$$

Якщо розглядається рівновага тіл із закріпленою віссю обертання, то доцільно виконувати таку систему дій:

1. Після з'ясування того, які сили діють на тіло, що перебуває у рівновазі,

їх точок прикладання виконати малюнок: зобразити тіло і всі сили, що діють на нього, з урахуванням їх точок прикладання.

2. Вибирається точка O , відносно якої будуть розглядатися моменти діючих на тіло сил.

3. Визначаються плечі і моменти сил.

4. Вибирається додатний напрямок обертання тіла відносно указаної точки O і складається рівняння моментів сил.

5. Якщо цього рівняння недостатньо, то виконуються зазначені дії відносно іншої точки обертання.

Поради

Точку обертання O можна вибрати довільно, але у багатьох випадках вдалий вибір цієї точки значно спрощує розв'язок.

Точку O , у загальному випадку, зручно вибрати так, щоб через неї проходило якомога більше ліній дії сил, крім шуканої сили.

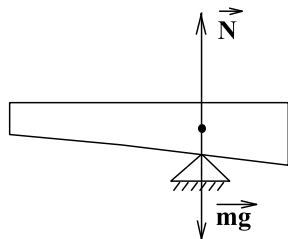
Моменти цих сил відносно такої точки будуть рівними нулю (оскільки плечі цих сил будуть рівними нулю), і рівняння моментів стане простим.

Якщо в отримане рівняння моментів входить дві й більше невідомих величин, до нього можна додати рівняння моментів, взятих відносно інших точок.

Задача. Колоду довжиною 12м можна зрівноважити у горизонтальному

положенні на підпорці, що віддалена на 3м від її товстого кінця. Якщо ж підпорка буде знаходитись у 6м від товстого кінця і на тонкий кінець сяде робітник масою 60кг, колода знову буде у рівновазі. Визначити масу колоди.

$m - ?$
 $l = 12\text{м}$
 $l_1 = 3\text{м}$
 $l_2 = 6\text{м}$
 $m_1 = 60\text{кг}$



1. Колода в обох випадках перебуває у рівновазі.

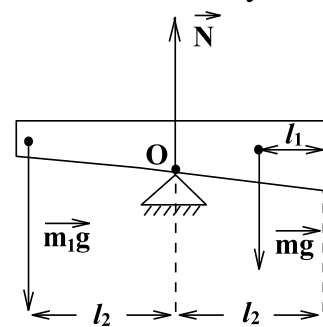
У першому випадку колода буде перебувати у рівновазі за умови, що лінія дії сили тяжіння проходить через підпорку. Отже, ця частина умови задачі визначає положення точки

прикладання сили тяжіння, що діє на колоду.

2. На колоду діють три сили:

$\vec{m}\vec{g}, \vec{N}, \vec{m}_1\vec{g}$.

Колода буде перебувати в рівновазі, якщо сума моментів сил, що діють на неї, відносно будь-якої точки обертання, дорівнюватиме нулю.



За точку O виберемо точку опори (вісь обертання проходить через цю точку перпендикулярно до площини малюнку). Тоді момент сили \vec{N} відносно цієї точки дорівнює нулю.

За додатній напрям вибираємо напрямок за годинниковою стрілкою.

Моменти сил: $M_1 = m_1gl_2, M_2 = mg(l_2 - l_1)$.

Рівняння моментів сил: $mg(l_2 - l_1) - m_1gl_2 = 0$.

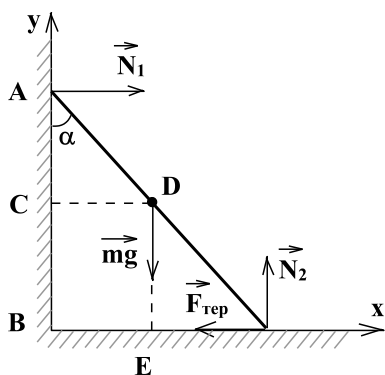
Звідси $m = m_1 \frac{l_2}{l_2 - l_1}$.

Задача. Дробина нахилена до гладенької вертикальної стінки під кутом $\alpha = 30^\circ$. Чи зможе людина піднятися по дробині до її середини раніше, ніж дробина почне ковзати, якщо коефіцієнт тертя між дробиною і горизонтальною підлогою $\mu = 0,32$. Масою дробини і тертям об стіну можна знехтувати.

$$\begin{array}{|l} \mu_1 - ? \\ \alpha = 30^\circ \\ \mu = 0,32 \end{array}$$

Дробина перебуває в рівновазі.

Дробина залишиться в рівновазі за умови, що людина буде знаходитися посередині дробини, якщо коефіцієнт тертя між дробиною і підлогою не перевищуватиме $0,3$ ($\mu_1 \leq \mu$).



На дробину діють сили \vec{N}_1 (сила тиску стінки на дробину), \vec{mg} (вага людини), \vec{N}_2 (сила тиску підлоги на дробину) і сила тертя $\vec{F}_{\text{тер}}$.

Умова рівноваги:

$$\vec{N}_1 + \vec{mg} + \vec{N}_2 + \vec{F}_{\text{тер}} = 0.$$

В проекціях на осі координат:

$$\text{OX: } N_1 - F_{\text{тер}} = 0$$

$$\text{OY: } N_2 - mg = 0$$

Додаткова умова: $F_{\text{тер}} = \mu_1 N_2$.

Отримали систему рівнянь з невідомими: N_1, N_2, mg, μ_1 , тому необхідно скористатися правилом моментів.

Розглянемо суму моментів сил відносно точки А:

$$M_1 = mg \frac{l}{2} \sin \alpha, M_2 = N_2 l \sin \alpha, M_3 = F_{\text{тер}} l \cos \alpha.$$

Додатний напрям – напрям руху годинникової стрілки.

$$M_1 - M_2 + M_3 = 0, \frac{1}{2} mgl \sin \alpha - N_2 l \sin \alpha + \mu_1 N_2 l \cos \alpha = 0.$$

З першої системи рівнянь випливає:

$$N_2 = mg, F_{\text{тер}} = N_1 \text{ або } \mu N_2 = N_1, \mu_1 mg = N_1.$$

$$\text{Тому } \frac{1}{2} mgl \sin \alpha - mgl \sin \alpha + \mu_1 mgl \cos \alpha = 0$$

$$-\frac{1}{2} mgl \sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha = 0, \mu_1 = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha.$$

Отже, $\mu_1 = 0,25$.

Розглядаючи задачі на рівновагу тіл, що мають електричний заряд, описана логіка зберігається. Особливістю цих задач є наявність електричних сил, що діють на зарядженні тіла (точкові заряди, заряджені кулі). Враховуючи ці сили, корисно скористатися такими порадами:

1. Електричні сили можна розраховувати або за законом Кулона, або за формулою $F = qE$. Друга формула справедлива не тільки для точкового заряду, а й для заряджених протяжних тіл.

2. Якщо під час взаємодії заряджених тіл між ними відбувається перерозподіл зарядів, то додатково треба додати рівняння закону збереження зарядів.

3. Проводячи розрахунки у задачах з електростатики, корисно пам'ятати, що множник $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, що входить у розрахункові формули, дорівнює

$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{М}}{\text{Ф}}$. Саме таке значення k і треба підставляти у ці формули.

У формулу $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$ входять модулі зарядів q_1 і q_2 .

4. Під час визначення результуючої сили, з якою на даний заряд діють декілька інших зарядів, або розрахунків результуючої напруженості поля, створеного кількома точковими зарядами, корисно скористатися таким прийомом: указати всі сили або вектори напруженості, що відносяться до даної точки простору; провести через цю точку осі координат; знайти суму проєкцій всіх векторів на кожну вісь координат; знайти результуючий вектор сили або напруженості за формулою: $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$, $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$, де F_x, F_y, E_x, E_y результат складання відповідних проєкцій векторів.

5. Напруженості полів, що створюються точковим і зарядженими протяжними тілами, розраховуються за формулами:

- Модуль вектора напруженості поля створеного точковим зарядом q на відстані r від заряду: $E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$.

- Якщо на поверхні провідної кулі радіусом r_0 рівномірно розподілений заряд q , то в середині кулі у всіх її точках напруженість поля дорівнює нулю. За межами кулі і на її поверхні напруженість поля така сама, яку створив би точковий заряд q , розташований у центрі кулі: $E = \frac{|q|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$, $r \geq r_0$.

- Нескінченно велика площа, на якій розподілено заряд з поверхневою густиною σ , створює у напрямі нормалі до поверхні однорідне електричне поле, напруженість якого $E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon\epsilon_0}$.

- Напруженість поля паралельних нескінченних рівномірно заряджених пластин $E = \frac{|\sigma|}{\epsilon\epsilon_0}$. Поза пластинами $E = 0$.

- Для будь-якої точки на осі кільця напруженість електричного поля напрямлена вздовж осі кільця, а модуль напруженості дорівнює:

$$E = \frac{q L}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + L^2)^{3/2}}$$

де L – відстань вздовж осі кільця від його центра, R – радіус кільця.

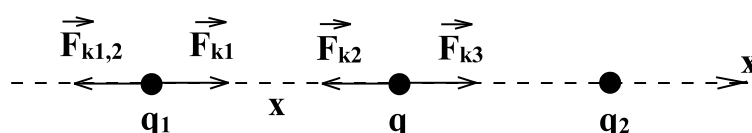
3. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач на рівновагу заряджених тіл.

Задача. Два позитивних заряди $q_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ Кл і $q_2 = 9 \cdot 10^{-6}$ Кл перебувають на відстані $l = 30$ см один від одного. Який заряд і де треба помістити, щоб вся система перебувала у рівновазі? Чи буде рівновага стійкою?

$x = ?$	$q = ?$
$q_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ Кл	
$q_2 = 9 \cdot 10^{-6}$ Кл	
$l = 30$ см	

Усі три заряди перебувають у рівновазі. Заряди q_1 і q_2 однойменні, тому вони відштовхуються один від одного. Для того, щоб кожен з цих зарядів перебував у рівновазі, на них повинні діяти сили протилежного напрямку. Це стає можливим, якщо негативний заряд q помістити між зарядами

ми q_1 і q_2 .



Розглянемо рівновагу двох зарядів q_1 і q . На заряд q_1 діють сили $\vec{F}_{k1,2}$ і \vec{F}_{k1} , на заряд q діють сили \vec{F}_{k2} і \vec{F}_{k3} .

Умова рівноваги зарядів: $\vec{F}_{k1,2} + \vec{F}_{k1} = 0$ і $\vec{F}_{k2} + \vec{F}_{k3} = 0$, або в проекціях сил на осі координат: $-F_{k1,2} + F_{k1} = 0$, $F_{k3} - F_{k2} = 0$.

Додаткові умови:

$$F_{k1,2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 l^2}, F_{k1} = \frac{q_1 q}{4\pi\epsilon_0 x^2}, F_{k3} = \frac{q q_2}{4\pi\epsilon_0 (l-x)^2}, F_{k2} = \frac{q q_1}{4\pi\epsilon_0 x^2}$$

Отже, $F_{k1} = F_{k2}$.

Отримали систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 l^2} = \frac{q_1 q}{4\pi\epsilon_0 x^2} \\ \frac{q q_2}{4\pi\epsilon_0 (l-x)^2} = \frac{q q_1}{4\pi\epsilon_0 x^2} \end{cases}$$

З другого рівняння випливає:

$$\frac{q_2}{(l-x)^2} = \frac{q_1}{x^2}, (q_2 - q_1)x^2 + 2q_1 lx - q_1 l^2 = 0, x = 12 \text{ см.}$$

З першого рівняння знаходимо модуль заряду q :

$$q = \frac{x^2}{l^2} \cdot q_2, q = 1,44 \cdot 10^{-6} \text{ Кл.}$$

Таким чином, $q = -1,44 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$. Рівновага не стійка, адже при будь-якій зміні положення цих зарядів їх рівновага не поновлюється.

Задача. Дві кульки, що мають однакові заряди $q = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$, підвішені на однаковій висоті на тонких невагомих нитках рівної довжини. На однаковій відстані від цих кульок і на $h = 20 \text{ см}$ нижче них розміщено заряд Q . Визначити значення цього заряду, якщо відомо, що нитки висять вертикально, а відстань між ними $d = 30 \text{ см}$.

$$\begin{array}{|l} Q - ? \\ q = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \\ h = 20 \text{ см} \\ d = 30 \text{ см} \end{array}$$

Кульки перебувають у рівновазі.

Розглянемо одну з кульок.

На неї діють сили: $\vec{F}_{k1}, \vec{F}_{k2}, \vec{m}\vec{g}, \vec{F}_H$.

Заряд Q повинен бути негативним.

Умова рівноваги кульки:

$$\vec{F}_{k1} + \vec{F}_{k2} + \vec{m}\vec{g} + \vec{F}_H = 0.$$

В проекціях на осі координат:

$$\text{OX: } F_{k1} - F_{k2} \sin \alpha = 0$$

$$\text{OY: } F_H - mg - F_{k2} \cos \alpha = 0.$$

Додаткові умови:

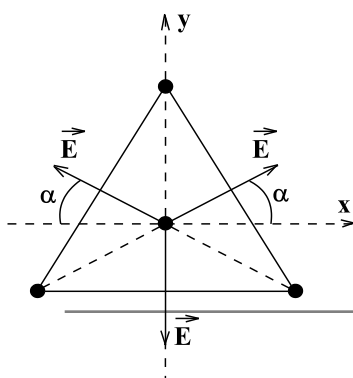
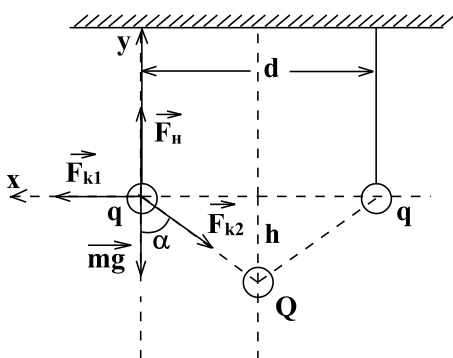
$$F_{k1} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 d^2}, F_{k2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 (h^2 + \frac{d^2}{4})}, \sin \alpha = \frac{d}{2\sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}}}$$

З першого рівняння отримуємо:

$$\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 d^2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 (h^2 + \frac{d^2}{4})} \cdot \frac{d}{2\sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{(4h^2 + d^2)^3}}{4d^3} \cdot q, Q = -3,8 \cdot 10^{-6} \text{ Кл.}$$

Задача. У вершинах рівностороннього трикутника



містяться три однакові заряди q . Знайти напруженість електричного поля в центрі трикутника. Який заряд треба помістити в цю точку, щоб результуюча сила, яка діє на кожен із трьох зарядів у вершинах, дорівнювала нулю?

1. У вершинах трикутника містяться позитивні точкові заряди. Вектор напруженості поля, створеного точковим зарядом, напрямлений вздовж прямої, яка з'єднує заряд і точку, в якій ця напруженість визначається. Заряд позитивний, вектор напруженості напрямлений від заряду. Заряди і відстані від них до центру трикутника однакові, тому модулі напруженостей полів, створених цими зарядами, також рівні.

Проводимо осі координат і знаходимо суму проекцій \vec{E} на кожную вісь.

$$\text{OX: } E \cos \alpha - E \cos \alpha = 0$$

$$\text{OY: } 2E \sin \alpha - E = 0, \text{ адже } \alpha = 30^\circ.$$

Таким чином результуюча напруженості в центрі трикутника

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \text{ дорівнює нулю.}$$

2. На заряд у вершині трикутника не діятиме результуюча сила з боку інших зарядів, за умови, що результуюча напруженості в цій точці дорівнюватиме нулю.

Усі заряди, що містяться у вершинах трикутника перебувають в однакових умовах. Тому достатньо розглянути один заряд.

$$E_1 = E_2 = E. \text{ Напруженість поля } E_3 \text{ створюється точковим зарядом } Q, \text{ який треба визначити.}$$

$E_x = 0$ і $E_y = 0$ згідно умови задачі (якщо результуюча напруженість дорівнює нулю, то і її складові E_x і E_y повинні дорівнювати нулю). Отже, сума проекцій напруженостей на осі координат відповідно дорівнюють:

для осі OX: $E_3 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - E_1 - E_1 \cos \alpha = 0$
 для осі OY: $E_3 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} - E_2 \sin \alpha = 0$.

$$\text{для осі OX: } E_3 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - E_1 - E_1 \cos \alpha = 0$$

$$\text{для осі OY: } E_3 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} - E_2 \sin \alpha = 0.$$

$$E_1 = E_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^2},$$

$$E_3 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{2}{3}a\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \frac{\sqrt{3}}{3}a^2}.$$

$$\text{Отже, } \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \frac{\sqrt{3}}{3}a^2} \cdot \sin 30^\circ = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^2} \cdot \sin 60^\circ,$$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{3}}.$$

Задача. Кулю, діаметр якої $d = 1\text{ см}$ і заряд $q = 10^{-6}\text{ Кл}$, помістили в масло з густиною $\rho_m = 0,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Густина матеріалу кулі $\rho = 8,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Яку напруженість повинно мати електричне поле, щоб поміщена в нього куля плавала в маслі? Напруженість електричного поля напрямлена вертикально вгору.

Куля перебуває в рівновазі.

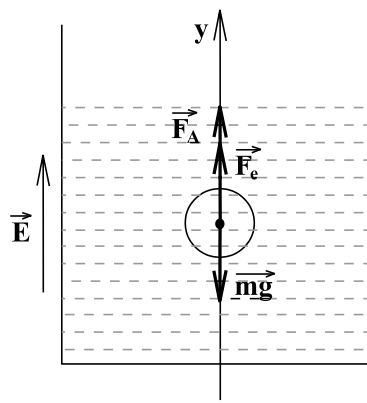
$E = ?$

$$d = 10^{-2} \text{ м}$$

$$q = 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$\rho_m = 0,8 \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$

$$\rho = 8,6 \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$



На кулю діють сили:

електрична сила $F_e = qE$;

архімедова сила $F_A = \rho_m V g$;

сила тяжіння $F_T = mg$.

Умова рівноваги кулі:

$$\vec{F}_e + \vec{F}_A + \vec{mg} = 0,$$

або в проекціях сил на координатні осі: $F_e + F_A - mg = 0$.

Звідси:

$$qE + \rho_m \frac{1}{6} \pi d^3 g - \rho \frac{1}{6} \pi d^3 g = 0.$$

$$E = \frac{\pi d^3 g (\rho - \rho_m)}{6q}, \quad E = 4 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

4. Самостійно розв'язати задачі:

1. Три заряджені кульки зв'язані одна з одною двома нитками і розміщені на одній прямій. Довжина кожної нитки $l = 1 \text{ м}$. Знайти силу натягу нитки, яка з'єднує першу і другу кульки. Заряди кульок $q_1 = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$, $q_2 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$, $q_3 = 8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$. Розмірами кульок можна знехтувати.

$$\text{(Відповідь: } T = \frac{q_1(q_2 + \frac{1}{4}q_3)}{4\pi\epsilon_0 l^2}, \quad T = 108 \cdot 10^{-9} \text{ Н).}$$

2. Дві однакові кульки, які мають однакові заряди $q = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$, підвішені на одній висоті, на нитках однакової довжини. Відстань між точками підвісу $r = 0,2 \text{ м}$. Який за значенням і знаком заряд слід помістити на відстані $d = 0,5 \text{ м}$ від кожної з кульок, щоб нитки були паралельними?

$$\text{(Відповідь: } Q = -2q \left(\frac{d}{r}\right)^3, \quad Q = -50 \cdot 10^{-6} \text{ Кл).}$$

3. Однакові за модулем, але різні за знаком заряди $q = 10^{-8} \text{ Кл}$ містяться у двох вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $a = 1 \text{ м}$. Визначити напруженість електричного поля в третій вершині трикутника.

$$\text{(Відповідь: } E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^2}, \quad E = 90 \frac{\text{В}}{\text{м}}).$$

План заняття

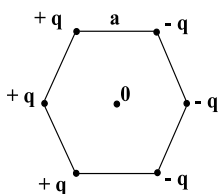
I. Перевірка знання студентами понять: електричний заряд, закон Кулона, напруженість електричного поля, принцип суперпозиції полів.

II. Колективний аналіз логіки розв'язування однієї з домашніх задач.

III. Розв'язування задач:

1. Коли дві однакові кульки масами 400мг кожна, що підвішені на закріплених в одній точці нитках рівної довжини, зарядили однойменними зарядами, вони розійшлись на 15см одна від одної, причому нитки утворили прямий кут. Знайти заряд кожної кульки.

$$\text{(Відповідь: } 100 \text{ нКл)}$$



2. Визначити напруженість поля E у центрі шестикутника, якщо заряди розміщені так, як це зображено на малюнку.

$$\text{(Відповідь: } E = \frac{q}{\pi\epsilon_0 a^2}, \text{ вектор } \vec{E} \text{ напрямлений вправо)}$$

3. При внесенні зарядженої металевої кулі, підвішеної на ізолюючій нитці, в однорідне електричне поле нитка утворила з вертикаллю кут 45° . На скільки зменшиться кут відхилення нитки при стіканні з кульки $1/10$ частини його заряду? Лінії напруженості напрямлені горизонтально.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

Розв'язування задач із розрахунку руху, роботи, енергії в електростатичному полі.

Підготовка до заняття

1. Пригадати зміст понять: провідники і діелектрики в електричному полі, потенціал і різниця потенціалів. [, с. 68-70].

2. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач на розрахунок руху, роботи, енергії в електричному полі.

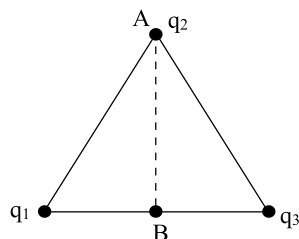
Задача. Три однакові заряди $q = 10^{-6}$ Кл розміщені у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $r = 20$ см. Яку роботу треба виконати, щоб розмістити ці заряди в одну лінію з відстанню 10 см між сусідніми? Заряди перебувають у вакуумі.

$A = ?$

$$q_1 = q_2 = q_3 = q = 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$r = 20 \text{ см}$$

$$a = 10 \text{ см}$$



Заряди розмістяться на одній лінії з відстанню $a = \frac{r}{2}$ між сусідніми, якщо заряд q_2 перенести з точки A в точку B .

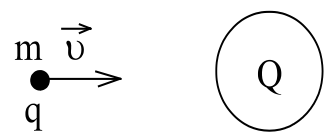
Заряд q_2 буде переміщуватися в електричному полі, створеному двома точковими зарядами q_1 і q_3 . При цьому виконується робота, яка не залежить від форми траєкторії руху заряду, а визначається тільки початковим і кінцевим його положенням у полі $A = q_2(\varphi_B - \varphi_A)$.

Якщо поле створене кількома зарядами, то потенціал результуючого поля дорівнює сумі потенціалів полів, створених в цій точці окремими зарядами. Знак потенціалу визначається знаком заряду.

$$\text{Отже, } \varphi_A = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{q_3}{4\pi\epsilon_0 r} = 2 \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad \varphi_B = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 a} + \frac{q_3}{4\pi\epsilon_0 a} = 2 \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \frac{r}{2}} = \frac{4q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

$$A = q \left(4 \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 r} \right) = \frac{2q^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{q^2}{2\pi\epsilon_0 r}, \quad A = 0,09 \text{ Дж.}$$


Задача. Маленьку металеву кульку, маса якої $m = 1 \text{ г}$, а заряд $q = +10^{-7} \text{ Кл}$, кинули здалека зі швидкістю $v = 1 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ в металеву сферу зарядом $Q = +3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$. За якого мінімального значення радіусу сфери кулька досягає її поверхні?

$R - ?$ $m = 10^{-3} \text{ кг}$ $q = +10^{-7} \text{ Кл}$ $v = 1 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ $Q = +3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$		<p>Радіус сфери мінімальний за умови, що швидкість кульки в момент досягнення поверхні сфери стане рівною нулю.</p> <p>Сфера створює електричне поле таке саме, як створював би точковий заряд Q розміщений у центрі сфери.</p>
--	--	--

Кулька рухається в електричному полі, створеному зарядженою сферою. Зміна кінетичної енергії кульки дорівнює роботі електричного поля. Потенціал електричного поля у початковому положенні кульки вважати мемо рівним нулю. Потенціал поля на поверхні зарядженої сфери $\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$.

$$\text{Отже, } \frac{mv^2}{2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 R^2}, \quad R = \frac{qQ}{2\pi\epsilon_0 mv^2}, \quad R = 0,54 \text{ м.}$$

Задача. Протон, який летить до нерухомого ядра двократно іонізованого атома гелію, на дуже великій відстані від ядра має швидкість $v_0 = 10^4 \frac{\text{М}}{\text{с}}$. На яку відстань протон зможе наблизитися до ядра? Заряд протона $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, маса $m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Розв'язати задачу для випадків: 1) ядро гелію весь час залишається нерухомим; 2) ядро гелію вільне.

$r - ?$ $v_0 = 10^4 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ $m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$		<p>1. Протон і ядро атома мають позитивні заряди. Тому протон, що летить у напрямку ядра буде гальмуватися полем ядра до тих пір, доки він не зупиниться на деякій відстані від ядра. У момент зупинки, коли швидкість однієї частинки відносно іншої дорівнюватиме нулю, відстань між ними буде мінімальною.</p>
--	---	---

Ядро гелію складається з двох протонів і двох нейтронів. Маса протона й нейтрона можна вважати рівними. Тому ядро має масу $4m$, а заряд $+2q$.

Поле ядра не однорідне. Тому на протон, що рухається, діє змінна сила. Як це було розглянуто на практичних заняттях з механіки у даному випадку треба скористатися не законами Ньютона, а законом збереження й перетворення енергії.

У початковий момент протон мав кінетичну енергію $W = \frac{mv_0^2}{2}$. У цій точці потенціал поля ядра φ_1 . У точці, в якій протон зупинився, потенціал поля ядра φ_2 , а кінетична енергія протона $W_2 = 0$.

$$W_2 - W_1 = A, \quad A = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad \varphi_1 = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 R}, \quad \varphi_2 = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 r},$$

Отже,

$$-\frac{mv_0^2}{2} = \frac{q^2}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right), \quad \frac{1}{R} = 0, \quad r = \frac{q^2}{2\pi\epsilon_0 mv_0^2}, \quad r \approx 3,45 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

2. Якщо протон наблизитиметься до вільного ядра гелію, то воно також почне рухатися, адже на нього будуть діяти сили електричного поля протона. Швидкість протона внаслідок гальмування полем буде зменшуватись, швидкість ядра буде збільшуватись, і в деякий момент швидкості частинок стануть однаковими. У цей момент часу відстань між протоном і ядром буде мінімальною. Це пояснюється наступним: після того як швидкості протона і ядра зрівняються, швидкість ядра продовжує збільшуватися, а протона зменшуватися до нуля, наслідком цього є зростання відстані між протоном і ядром; після зупинки протона він почне рухатися у протилежному напрямі.

Систему протон-ядро гелію вважатимемо ізольованою. До такої системи можна застосувати закон збереження імпульсу і енергії. Виберемо два стани системи: перший стан – частинки віддалені одна від одної на найбільшу відстань, другий стан – відстань між частинками мінімальна.

Запишемо закон збереження імпульсу:

1-й стан: імпульс протона $\overrightarrow{mv_0}$, а ядра – нуль;

2-й стан: імпульс протона \overrightarrow{mv} , а ядра – $4\overrightarrow{mv}$.

Вектори напрямлені в одну сторону вздовж однієї прямої

$$\overrightarrow{mv_0} = \overrightarrow{mv} + 4\overrightarrow{mv}$$

$$mv_0 = m\upsilon + 4m\upsilon$$

$$\upsilon = \frac{v_0}{5}.$$

Запишемо закон збереження енергії:

1-й стан: кінетична енергія протона $W_1 = \frac{mv_0^2}{2}$, ядра – $W_{я1} = 0$;

2-й стан: кінетична енергія протона і ядра відповідно $W_1 = \frac{m\upsilon^2}{2}$,

$$W_2 = \frac{4m\upsilon^2}{2}.$$

При переході системи з першого стану у другий сили поля виконують роботу $A = -\frac{q^2}{2\pi\epsilon_0 r}$ (таку саму, як і в першому випадку).

$$-\frac{q^2}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{5m\nu^2}{2} - \frac{m\nu_0^2}{2}. \text{ Враховуючи, що } \nu = \frac{\nu_0}{5} \text{ отримаємо: } r = \frac{5}{4} \cdot \frac{q^2}{\pi\epsilon_0 m\nu_0^2}.$$

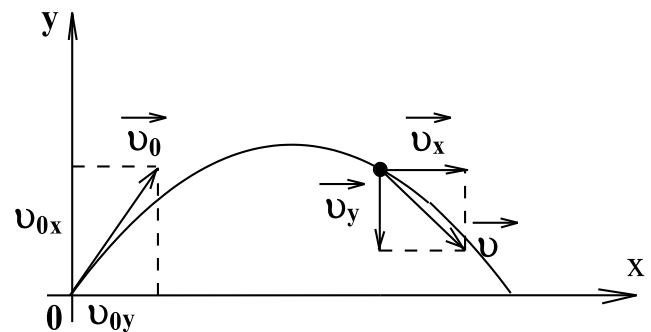
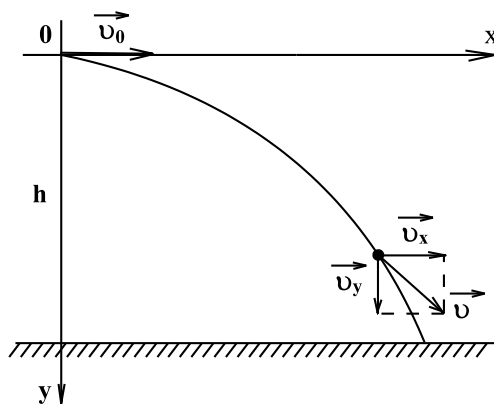
$$r = 4,3 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Задача. У плоский конденсатор довжиною $l = 5 \text{ см}$ влітає електрон під кутом $\alpha = 15^\circ$ до пластин. Електрон має енергію $W = 1500 \text{ еВ}$. Відстань між пластинами $d = 1 \text{ см}$. Визначити величину напруги на пластинах конденсатора U , за якої електрон при виході із конденсатора буде рухатися паралельно ним.

$U - ?$
 $l = 5 \text{ м}$
 $\alpha = 15^\circ$
 $W = 1500 \text{ еВ}$
 $d = 1 \text{ м}$
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кг}$

Задачі на рух заряджених частинок в однорідному електричному полі, створеному двома пластинами, що мають однакові але протилежні за знаком заряди, передбачають перенос у нову ситуацію систем дій, пов'язаних з аналізом руху в полі тяжіння тіл кинутих горизонтально або під кутом до горизонту.

Спільним для задач з механіки є те, що рух тіл розгляда-

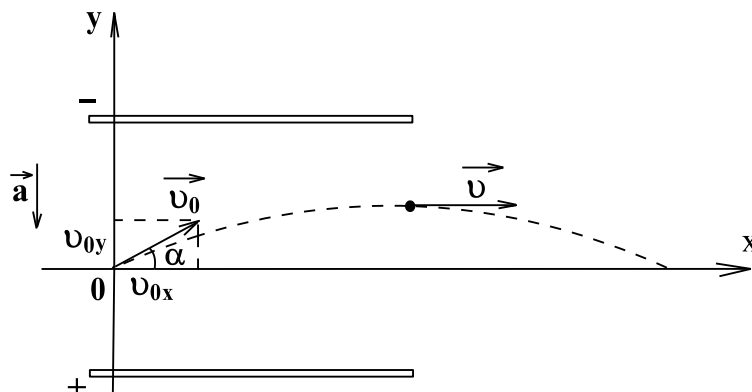


ється як одночасний рівномірний рух зі швидкістю \vec{v}_0 (або $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$) вздовж осі X і рівнозмінний рух з прискоренням $\vec{a} = \vec{g}$ – прискоренням сили тяжіння, з початковою швидкістю \vec{v}_0 (або $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$). Швидкість тіла у будь-який момент часу визначається значеннями v_x і v_y у цей момент часу.

В задачах на рух заряджених частинок в однорідному електричному полі використовуються зазначені положення.

Прискорення у даному випадку $\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$, де q і m відповідно заряд і маса

частинки, $E = \frac{U}{d}$, U – напруга між пластинами, d – відстань між ними.



Для зручності при переносі зазначених систем дій вважатимемо верхню пластину зарядженою негативно, а нижню – позитивно. Тоді у всіх точках простору між пластинами електрон має прискорення $a = \frac{E}{e}$, що напрямлене вертикально вниз.

Визначимо проекції вектора початкової швидкості на осі OX і OY:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha, \quad v_{0y} = v_0 \sin \alpha.$$

Прискорення: $a = \frac{eE}{m} = \frac{eU}{md}$.

У момент виходу з конденсатора проекції швидкості електрона на осі координат відповідно дорівнюють: $v_x = v_{0x} = v$, $v_y = 0$.

Рух електрона вздовж осі OX рівномірний: $l = v_{0x} t$. Звідси $t = \frac{l}{v_{0x}} = \frac{l}{v_0 \cos \alpha}$.

$$v_y = v_{0y} - at, \quad v_{0y} = at, \quad a = \frac{v_{0y}}{t} = \frac{v_0 \sin \alpha \cdot v_0 \cos \alpha}{l} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2l} \quad (\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha).$$

Враховуючи отримані вирази для прискорення, можна записати:

$$\frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2l} = \frac{eU}{md}.$$

Звідси $U = \frac{mv_0^2 \sin 2\alpha d}{2el}$.

Але, $\frac{mv_0^2}{2} = W$, тому $U = \frac{W \sin 2\alpha d}{el}$.

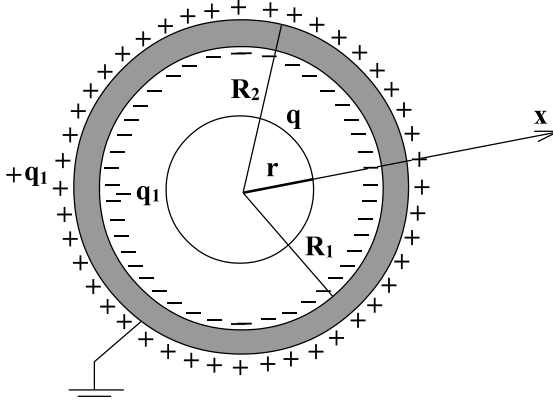
Задача. Металева кулька радіусом r , яка має заряд q , розміщена у центрі незарядженої сфери, внутрішній і зовнішній радіуси якої дорівнюють R_1 і R_2 . Знайти напруженість і потенціал електричного поля, створеного системою, якщо: а) сферу виготовлено з металу; б) металева сфера заземлена; в) сфера виготовлена з діелектрика проникністю ϵ .

Розрахунок полів, що створюються зарядженими сферами ґрунтується на формулах для напруженості і потенціалу електричного поля, а також принципу суперпозиції полів:

$$E = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r}, \quad \text{якщо } r \geq r_0.$$

Для того щоб знайти напруженість і потенціал поля в тій чи іншій точці простору, створеного кількома сферами, треба перш за все знайти їх заряд. Визначення модуля й знаку заряду, закону розподілу заряду на тілах, розміщених в електричному полі, являє, як правило, головну трудність у розв'язуванні задач такого типу. Якщо ж вдається знайти ці заряди, то напруженість і потенціал результуючого поля системи визначити легко.

а). Розмістивши провідник в електричному полі, в ньому під дією сил поля відбудеться розділення зарядів і на поверхні з'являться індуковані заряди. Розді-



лення зарядів відбуватиметься доти, доки вони своїм полем не компенсують зовнішнє електричне поле, тобто доки результуюче поле всередині провідника не стане рівним нулю. Відсутність електричного поля всередині провідника при рівновазі зарядів на провіднику – головна умова, яка дозволяє визначити індуковані заряди. Якщо під дією сил поля кулі електрони почнуть зміщуватися на внутрішню поверхню сфери і на ній

з'явиться індукційний заряд $-q_1$, то на зовнішній поверхні виникне такий самий заряд протилежного знаку $+q_1$. У результаті з'являться три концентричні заряджені сфери радіусів r, R_1, R_2 із зарядами $q, -q_1, +q_1$. У просторі між другою і третьою сферами напруженість електричного поля дорівнює нулю, тому на відстані x від спільного центру сфер при $R_1 \leq x \leq R_2$ згідно принципу суперпозиції полів і формули для напруженості поля зарядженої сфери повинно бути $k \frac{q}{x^2} - k \frac{q_1}{x^2} = 0$. Звідси $q_1 = q$.

При цьому було враховано, що друга сфера створює ззовні таке поле, якби її заряд знаходився у центрі, а поле третьої сфери в її внутрішній області відсутнє.

Відшукавши заряд на поверхні сферичної шару, можна перейти до визначення напруженості та потенціалу поля у різних точках простору.

Усередині кульки (при $0 < x < r$) $E=0$,

$$\varphi = k \frac{q}{r} - k \frac{q}{R_1} + k \frac{q}{R_2} = kq \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Між кулькою й шаром ($r \leq x \leq R_1$) $E = k \frac{q}{x^2}$,

$$\varphi = k \frac{q}{x} - k \frac{q}{R_1} + k \frac{q}{R_2} = kq \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Всередині сферичного шару ($R_1 \leq x \leq R_2$) $E=0$,

$$\varphi = k \frac{q}{x} - k \frac{q}{x} + k \frac{q}{R_2} = k \frac{q}{R_2}.$$

За межами системи ($R_2 \leq x \leq \infty$) $E = k \frac{q}{x^2}$, $\varphi = k \frac{q}{x}$.

б). Заряди, що виникають на поверхні заземленого провідника, можна знайти з умови, що потенціал його дорівнює нулю. Напруженість електричного поля у провіднику також дорівнює нулю, але заряди на поверхнях сферичного шару будуть неоднакові. На відміну від попереднього висновку вони можуть стікати з оболонки або, навпаки, набігати на неї. Якщо припустити, що на внутрішній поверхні шару з'являється заряд $-q_1$, а на зовнішній – заряд $+q_2$, то результуючий потенціал на заземленій поверхні шару ($x = R_2$) буде дорівнювати: $\varphi = k \frac{q}{R_2} - k \frac{q_1}{R_2} + k \frac{q_2}{R_2} = 0$. Звідси випливає, що $q_1 - q_2 = q$.

Оскільки поле всередині провідника відсутнє, то повинно бути: $E = k \frac{q}{x^2} - k \frac{q_1}{x^2} = 0$. Отже, модуль заряду на внутрішній поверхні заземленого шару дорівнює $q_1 = q$, $q_2 = 0$, тобто на зовнішній поверхні заземленого шару заряду немає, а на внутрішній поверхні знаходиться заряд $q_1 = -q$.

Таким чином, задача зводиться до визначення поля двох заряджених концентричних сфер радіусами r і R_1 , на яких містяться заряди $+q$ і $-q$.

При розрахунку поля даної системи можна скористатися результатом пункту а), поклавши у всіх отриманих там формулах заряд третьої сфери рівним нулю.

Таким чином, отримуємо:

всередині кульки $E = 0$, $\varphi = kq \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_1} \right)$, при $0 \leq x \leq r$;

між кулькою і шаром $E = k \frac{q}{x^2}$, $\varphi = \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{R_1} \right)$, $r \leq x \leq R_1$;

при $R_1 \leq x \leq \infty$ поле відсутнє.

в). Якщо сферичний шар виготовлений з діелектрика, то при внесенні його в електричне поле зарядженої кульки відбудеться поляризація шару й на внутрішній і зовнішній поверхнях з'являться зв'язані заряди $+q$ і $-q$. Значення їх визначають таким чином. Електричне поле, яке створене зарядженою кулькою, у діелектрику послаблене в ϵ разів. Тому, якщо ми візьмемо деяку точку всередині сферичного шару, віддалену від центру кульки на відстань x , то напруженість поля в ній, з одного боку, буде дорівнювати $E = k \frac{q}{\epsilon r^2}$, а з другого боку, її можна визначити як результат накладання поля кульки і поля зв'язаних зарядів внутрішньої поверхні оболонки: $E = k \frac{q}{x^2} - k \frac{q_1}{x^2}$.

Порівнюючи обидва вирази для E , ми знайдемо модулі зв'язаних зарядів, що виникають на поверхні діелектрика: $q_1 = \frac{\epsilon-1}{\epsilon} q$.

Після цього задача зводиться до визначення поля трьох концентричних сфер радіусів r , R_1 , R_2 , на яких знаходяться заряди q , $-\frac{\epsilon-1}{\epsilon} q$ і $+\frac{\epsilon-1}{\epsilon} q$.

Аналогічно результатам пункту а) знаходимо:

$$E = 0, \varphi = kq \left[\frac{1}{r} - \frac{\epsilon-1}{\epsilon} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right], \text{ при } 0 \leq x \leq r;$$

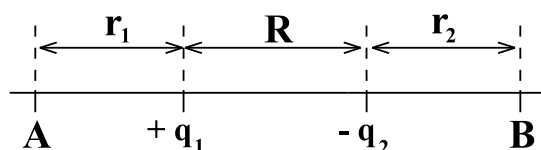
$$E = k \frac{q}{x^2}, \varphi = \left[\frac{1}{x} - \frac{\epsilon-1}{\epsilon} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right], \text{ при } r \leq x \leq R_1;$$

$$\text{при } R_1 \leq x \leq \infty \quad E = k \frac{q}{x^2}, \varphi = \left[\frac{1}{x} - \frac{\epsilon-1}{\epsilon} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{R_2} \right) \right];$$

$$\text{якщо } R_2 \leq x \leq \infty, \text{ то } E = k \frac{q}{x^2}, \varphi = k \frac{q}{x}.$$

3. Самостійно розв'язати задачі:

1. Визначити роботу, виконану при переміщенні точкового заряду q з точки А в точку В у полі, створеному двома різнойменними точковими зарядами



$+q_1$ і $-q_2$, відстань між якими дорівнює R . Відстань точки А від першого заряду дорівнює r_1 , а точки В від другого заряду $-r_2$.

$$\text{(Відповідь: } A = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} - \frac{q_2}{R+r_1} - \frac{q_1}{R+r_2} + \frac{q_2}{r_2} \right)).$$

2. Пучок електронів, напрямлений паралельно обкладкам плоского конденсатора, на шляху $l=4$ см відхиляється на відстань $x=2$ мм від початкового напрямку. Яку швидкість мають електрони? Напруженість електричного поля в конденсаторі $E = 22500 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. Відношення заряду електрона до його маси $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

$$\text{(Відповідь: } v = l \sqrt{\frac{eE}{m2x}} \cdot 10^{-3}).$$

3. Всередині порожньої сфери радіусом R міститься сфера радіусом r . Сфері радіусом R надали заряд Q , а сфері радіусом r – заряд q . Визначити потенціали поверхонь сфер.

(Відповідь: зовнішньої $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q+q}{R}$, внутрішньої $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{R} + \frac{q}{r} \right)$).

План заняття

I. Перевірка знання студентами понять: провідники і діелектрики в електричному полі, потенціал і різниця потенціалів.

II. Колективний аналіз логіки розв'язування однієї з домашніх задач.

III. Розв'язування задач:

1. Три однакові заряджені частинки, маса кожної з яких $m = 2\text{г}$, а заряд $q = 10^{-8}\text{Кл}$, помістили у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $a = 10\text{см}$. Потім частинки одночасно звільнили, після чого вони почали симетрично розміщуватися під дією кулонівських сил відштовхування. Знайти максимальне значення швидкості частинок.

(Відповідь: $v = \sqrt{\frac{q^2}{\pi\epsilon_0 m a}}$).

2. Пучок електронів після проходження прискорюючої різниці потенціалів $U_0 = 10\text{кВ}$, влітає в середину між пластинами плоского конденсатора паралельно їм. Яку напругу треба подати на пластини конденсатора, щоб пучок електронів при виході з конденсатора відхилився від свого початкового напрямку на максимальний кут? Довжина пластин $l = 10\text{см}$, відстань між ними $d = 3\text{см}$.

(Відповідь: $U = \frac{2d}{l^2} \cdot U_0$).

3. Всередину порожньої провідної незарядженої сфери внесено кульку з зарядом $+Q$. Знайти: 1. Яким буде розподіл індукованих зарядів на сфері? 2. Намалювати приблизну картину силових ліній електричного поля всередині і зовні сфери. 3. Чи буде заряд $+Q$ діяти на заряджену кульку, що знаходиться поза сферою? Чому? 4. Як зміниться розподіл зарядів, якщо сферу з'єднати із Землею?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3

Розв'язування задач з визначення характеристик конденсаторів та їх систем

Підготовка до заняття

1. Пригадати зміст понять: електроємність, конденсатор, енергія електричного поля. [, с. 69-70].

2. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач.

Задача. Плоский конденсатор, площа кожної з пластин якого S , зарядили до різниці потенціалів U і від'єднали від джерела струму. Діелектриком у конденсаторі є скляна пластинка товщиною d . Діелектрична проникність скла ϵ . Обчислити: електричну ємність і заряд конденсатора; силу, з якою притягуються пластини одна до одної; механічну роботу, яку треба виконати проти електричних сил, витягуючи пластинку з конденсатора.

Для визначення характеристик (фізичних величин), що властиві конденсатору, треба виходити із взаємозв'язків між ними.

1. Ємність плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$.

2. Заряд конденсатора $q = CU$.

3. Сила взаємодії пластин конденсатора $F = \frac{q^2}{\epsilon \epsilon_0 S}$.

4. Робота, яка виконується під час виймання діелектрика з конденсатора дорівнює зміні енергії конденсатора. Енергія конденсатора з пластинкою діелектрика $W_1 = \frac{cU^2}{2}$. Енергія конденсатора (повітряного) без пластинки $W_2 = \frac{cU^2}{\epsilon^2}$, адже ємність повітряного конденсатора в ϵ разів менша.

Отже, $A = \frac{cU^2}{2} \cdot \frac{\epsilon - 1}{\epsilon} = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2d} (\epsilon - 1)$.

Задача. Два плоских конденсатора з ємностями C_1 і C_2 з'єднали послідовно і подали напругу U_0 . Потім їх від'єднали від джерела струму. Якою буде різниця потенціалів між пластинами конденсаторів, якщо їх з'єднати паралельно? Розв'язати задачу за умови, що спочатку конденсатори з'єднували із джерелом окремо кожний, а потім з'єднували однойменно зарядженими пластинами; різнойменно зарядженими пластинами.

У задачі розглядаються різні з'єднання конденсаторів, тому під час її розв'язування необхідно враховувати закономірності таких з'єднань.

Якщо обкладки одного конденсатора з'єднуються з обкладками другого конденсатора і між ними немає розгалуження, то з'єднання конденсаторів є послідовним.

Якщо до джерела з напругою U_0 приєднати батарею послідовно з'єднаних конденсаторів, то $U_0 = U_1 + U_2 + \dots + U_n$, де U_1, U_2, \dots, U_n – напруги на окремих конденсаторах.

У даному випадку заряди окремих конденсаторів дорівнюють заряду всієї батареї $q_0 = q_1 = q_2 = \dots = q_n$.

Ємність такої батареї конденсаторів визначається з формули: $C_0 = \frac{|q_0|}{U_0}$,
 $\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$.

За умови, що $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$, ємність батареї дорівнюватиме $C_0 = \frac{C}{n}$.

При паралельному з'єднанні (з'єднанні однойменно заряджені обкладки) конденсаторів напруга на батареї $U_0 = U_1 = U_2 = \dots = U_n$, де U_1, U_2, \dots, U_n – напруги на окремих конденсаторах.

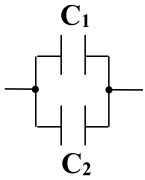
Ємність такої батареї конденсаторів C_0 дорівнює:

$$C_0 = \frac{|q_0|}{U_0}; C_0 = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

За умови, що $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$ ємність батареї $C_0 = Cn$.

Розглянемо ситуації даної задачі.

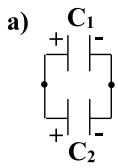
1. Напруга на кожному конденсаторі після від'єднання джерела відповідно дорівнює U_1 і U_2 . При цьому $U_1 + U_2 = U_0$. Заряди конденсаторів $q_1 = C_1 U_1$ і $q_2 = C_2 U_2$. Але $q_0 = q_1 = q_2$, де q_0 – заряд батареї $q_0 = C_0 U_0$. $C_0 = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ – ємність батареї. Отже, $q_1 = q_2 = q_0 = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \cdot U_0$.



Ці заряджені конденсатори з'єднані паралельно. За законом збереження заряду заряд такої батареї $q = 2q_1$, а її ємність $C = C_1 + C_2$. Тому напруга на батареї і на кожному конденсаторі:

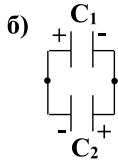
$$U = \frac{q}{c} = \frac{2q_1}{c} = \frac{2C_1 \cdot C_2}{(C_1 + C_2)^2} \cdot U_0.$$

2. Якщо кожен конденсатор окремо під'єднати до джерела, то напруга на



конденсаторах буде однакова і дорівнюватиме U_0 , а їх заряди відповідно $-q_1 = C_1 U_0$, $q_2 = C_2 U_0$.

а). З'єднавши однойменно заряджені пластини, отримуємо паралельне з'єднання конденсаторів, адже напруга на них однакова і дорівнює U_0 .



б). Після з'єднання пластин, що мають заряди протилежних знаків, спостерігається наступне: відбувається перерозподіл зарядів до тих пір, доки на з'єднаних пластинах не залишаться відповідні однойменні заряди.

Якщо заряд конденсатора C_1 більше заряду конденсатора C_2 , то на кожному конденсаторі пластини матимуть заряди такого ж знаку, як і на приєднаних до них пластинах верхнього конденсатора і навпаки. Отже, у будь-якому випадку приходимо до паралельного з'єднання конденсаторів. Сумарний заряд, який залишається на конденсаторі:

з одного боку $q = C_1 U_0 - C_2 U_0 = U_0 (C_1 - C_2)$,

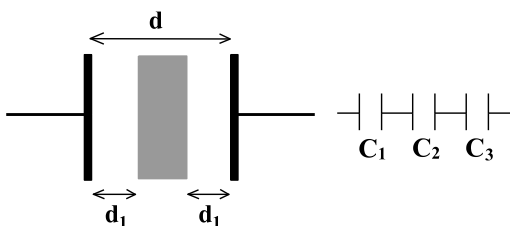
з другого боку $q = C_1 U_1 + C_2 U_1 = U_1 (C_1 + C_2)$,

отже, $U_0 (C_1 - C_2) = U_1 (C_1 + C_2)$, $U_1 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot U_0$.

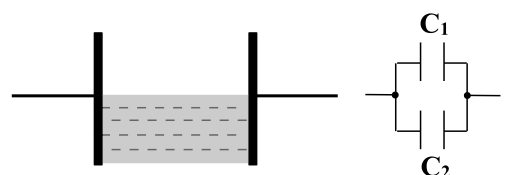
Задача. Два однакових плоских конденсатори приєднали до джерел напруги U . Простір між пластинами конденсаторів заповнено шарами діелектриків однакової товщини з діелектричними проникностями ϵ_1 і ϵ_2 . В одному конденсаторі шари розміщені паралельно обкладкам, у другому – перпендикулярно. У скільки разів відрізняються електроємності цих конденсаторів та напруженості полів в однорідних діелектриках? Чому дорівнює поверхнева густина зв'язаних зарядів на межі поділу діелектриків? (, С. 265-267).

Є група задач, в яких конденсатор перетворюється на складний конденсатор, шляхом заповнення частини або всього простору між його обкладками шарами діелектриків чи внесенням у цей простір металевих пластин. У таких випадках складний конденсатор розглядається як батарея конденсаторів, з'єднаних паралельно або послідовно.

Наприклад:

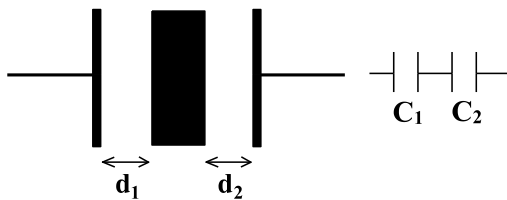


1. У плоский повітряний конденсатор вносять пластину з діелектрика, товщина якої вдвічі менша зазору між обкладками. Такий конденсатор можна розглядати як три послідовно з'єднаних конденсатора – два повітряних і один з діелектриком.



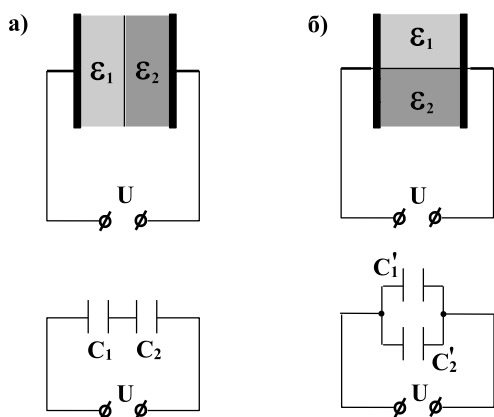
2. З плоского конденсатора, простір між пластинами якого заповнено гасом, частина

гасу витікає. Такий конденсатор можна розглядати як паралельне з'єднання двох конденсаторів. У одного конденсатора діелектриком є повітря, а у другого – гас.



відповідно дорівнюють d_1 і d_2 .

Задача, що розглядається, відноситься до даної групи задач. Розміщення шарів діелектриків показано на малюнку.



Як видно з малюнку, площі обкладок цих конденсаторів однакові і дорівнюють площі пластини S повітряного конденсатора. Відстань між обкладками визначається товщиною внесених шарів діелектриків, у даному випадку вони однакові і дорівнюють половині відстані d між пластинами.

Ємність двох послідовно з'єднаних конденсаторів дорівнює:

$$\frac{1}{C_{\text{пс}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{або} \quad C_{\text{пс}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}.$$

Підставляючи у цю формулу вирази $C_1 = \frac{2\epsilon_0\epsilon_1 S}{d}$ і $C_2 = \frac{2\epsilon_0\epsilon_2 S}{d}$ для спільної ємності отримаємо: $C_{\text{пс}} = \frac{2\epsilon_0\epsilon_1\epsilon_2 S}{(\epsilon_1 + \epsilon_2)d} = \frac{2\epsilon_1\epsilon_2 C_0}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$, де $C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ – ємність повітряного конденсатора до внесення діелектриків.

Якщо шари діелектриків розміщені перпендикулярно пластинам, складний конденсатор можна розглядати як систему двох конденсаторів ємностями C'_1 і C'_2 , з'єднаних між собою паралельно через самі пластини. На відміну від попереднього випадку однаковими будуть не площі пластин, а відстані між ними. Самі ж площі визначаються об'ємом внесених шарів діелектриків. У випадку, що розглядається, об'єми рівні, тому площі пластин мають значення $S/2$.

Ємність двох конденсаторів з'єднаних паралельно, дорівнює $C_{\text{пр}} = C'_1 + C'_2$.

$$C'_1 = \frac{\epsilon_0\epsilon_1 S}{2d}, \quad C'_2 = \frac{\epsilon_0\epsilon_2 S}{2d}, \quad C_{\text{пр}} = \frac{\epsilon_0(\epsilon_1 + \epsilon_2)S}{2d} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)C_0}{2}.$$

$$\text{Таким чином,} \quad \frac{C_{\text{пс}}}{C_{\text{пр}}} = \frac{4\epsilon_1\epsilon_2}{(\epsilon_1 + \epsilon_2)^2}.$$

3. У середину плоского повітряного конденсатора внесли металеву пластину, товщина якої менше зазору між обкладками конденсатора. Такий конденсатор можна розглядати як послідовне з'єднання двох повітряних конденсаторів, зазори між пластинами яких

1). Якщо паралельно обкладкам плоского конденсатора ввести шари діелектриків, що заповнюють повітряний простір, то такий складний конденсатор можна розглядати як два конденсатора ємностями C_1 і C_2 , з'єднаних послідовно площиною контакту діелектриків. Обкладками першого конденсатора у даному випадку слугують граничні шари діелектрика з проникністю ϵ_1 , обкладками другого – граничні шари діелектрика з проникністю ϵ_2 . Як видно

2). Щоб зсувати, у скільки разів відрізняються напруженості полів у шарах діелектриків, можна спочатку визначити значення E_1, E_2, E'_1, E'_2 у кожному шарі для одного і другого випадків.

При паралельному з'єднанні конденсаторів ємностями C_1 і C_2 напруга U , що подана на них, дорівнює сумі напруг на першому і другому шарах діелектриків: $U = U_1 + U_2$.

Оскільки поля в діелектриках однорідні, то $U_1 = E_1 \cdot \frac{d}{2}, U_2 = E_2 \cdot \frac{d}{2}$.

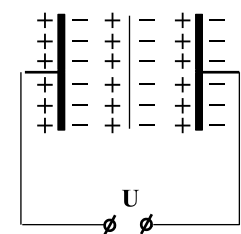
Отже, $U = (E_1 + E_2) \frac{d}{2}$.

При накладанні на діелектрики зовнішнього поля напруженістю E_0 , напруженість у кожному середовищі зменшиться відповідно у ϵ_1 і ϵ_2 разів, тобто $E_1 = \frac{E_0}{\epsilon_1}, E_2 = \frac{E_0}{\epsilon_2}$. Звідси $E_1 \epsilon_1 = E_2 \epsilon_2, E_1 = \frac{2\epsilon_2 U}{(\epsilon_1 + \epsilon_2)d}$ і $E_2 = \frac{2\epsilon_1 U}{(\epsilon_1 + \epsilon_2)d}$.

Якщо шари діелектриків перпендикулярні пластинам, то напруга на кожному з утворених конденсаторів ємностями C'_1 і C'_2 однакова і дорівнює U . Тому $E'_1 = \frac{U}{d}, E'_2 = \frac{U}{d}$.

Напруженості полів у першому і другому середовищі відносяться одна до одної як $\frac{E_1}{E'_1} = \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}, \frac{E_2}{E'_2} = \frac{2\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$.

3). При накладанні на діелектрик зовнішнього електричного поля відбувається поляризація діелектрика і на його поверхні, перпендикулярній силовим лініям поля, з'являються зв'язані заряди. Розглянемо перший шар діелектрика. Він знаходиться в електричному полі, створеному пластинами конденсатора. Напруженість цього поля $E_0 = \frac{U}{d}$, оскільки на пластини подано напругу U і відстань між ними d . Напруженість поля у першому середовищі буде послаблено в ϵ_1 разів і дорівнюватиме $E_1 = \frac{E_0}{\epsilon_1} = \frac{U}{\epsilon_1 d}$. Це поле є результатом накладання двох полів: поля напруженістю \vec{E}_0 і поля напруженістю \vec{E}_c , створеного зв'язаними зарядами й напрямленого назустріч полю пластин, тобто $E_1 = E_0 - E_c$ або $\frac{U}{\epsilon_0 d} = \frac{U}{d} - E_c$.

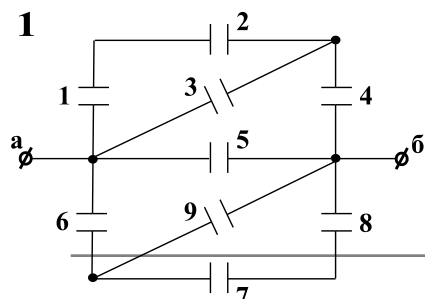


Напруженість E_c поля зв'язаних зарядів, розподілених з поверхневою густиною $+\sigma_1, -\sigma_1$ на торцях першого шару діелектрика, можна розглядати як напруженість поля, створеного двома паралельними зарядженими пластинами, тому $E_c = \frac{\sigma_1}{\epsilon_0}$.

Таким чином, $\frac{U}{\epsilon_1 d} = \frac{U}{d} - \frac{\sigma_1}{\epsilon_0}, \sigma_1 = \frac{\epsilon_0(\epsilon_1 - 1)U}{\epsilon_1 d}$.

Аналогічно для другого шару діелектрика: $\sigma_2 = \frac{\epsilon_0(\epsilon_2 - 1)U}{\epsilon_2 d}$.

Задача. Визначити ємність батареї конденсаторів.



Є група задач, в яких безпосередньо можна виявити послідовні і паралельні з'єднання конденсаторів. Тому під час розв'язування таких задач послідовно визначають спільні ємності конденсаторів

з'єднаних або послідовно, або паралельно.

Розглянемо частину схеми, що розміщена вище лінії аб.

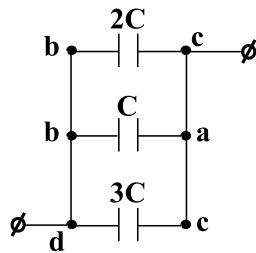
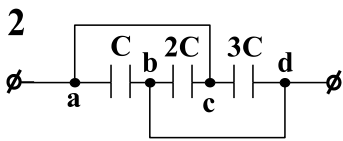
Конденсатори 1 і 2 з'єднані послідовно. Їх спільна ємність $C_{12} = \frac{C}{2}$. Отже конденсатори 1 і 2 можна замінити одним із ємністю C_{12} .

Конденсатор C_{12} з'єднано паралельно з конденсатором 3. Їх спільна ємність $C_{123} = \frac{C}{2} + C = \frac{3}{2}C$.

Конденсатор C_{123} з'єднано послідовно з конденсатором 4. Їх спільна ємність $C_{1234} = \frac{\frac{3}{2}C \cdot C}{\frac{3}{2}C + C} = \frac{3}{5}C$.

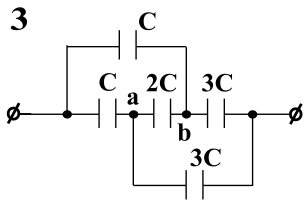
Аналогічно спільна ємність конденсаторів 6,7,8,9 дорівнює $C_{6789} = \frac{3}{5}C$.

Конденсатори C_{1234} , C_5 , C_{6789} з'єднані паралельно. Їх спільна ємність, отже і ємність батареї конденсаторів дорівнює $C = \frac{3}{5}C + C + \frac{3}{5}C = \frac{11}{5}C$.



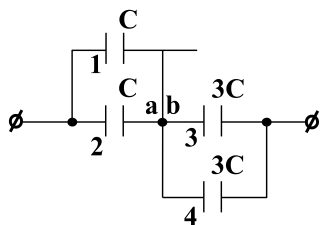
Є група задач, в яких задану схему з'єднання конденсаторів треба подати у такому вигляді, щоб наочно стало видно з'єднання конденсаторів.

Як видно, всі три конденсатори з'єднані паралельно. Їх спільна ємність $C = 2C + C + 3C = 6C$.



З'єднання конденсаторів може не відноситися ні до послідовного, ні до паралельного. Спільну ємність такого складного з'єднання можна знайти просто лише у тих випадках, коли у схемі є точки з однаковими потенціалами. Такі точки можна з'єднувати і роз'єднувати, розподіл зарядів і потенціалів на конденсаторах від цього не зміниться. Точки з однаковими потенціалами є в схемах, які мають симетрію.

У даному випадку точки a і b мають однакові потенціали. Тому, якщо всю батарею конденсаторів під'єднати до джерела, то конденсатор 2C не буде заряджатися і його можна прибрати із схеми. Отримаємо послідовне з'єднання паралельно з'єднаних конденсаторів C, C і 3C, 3C.



Загальна ємність конденсаторів 1 і 2 буде $C_{12} = 2C$.

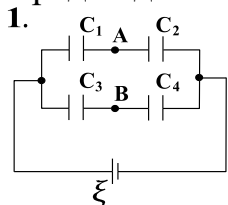
Загальна ємність конденсаторів 3 і 4 буде $C_{34} = 6C$.

Ємність батареї конденсаторів $C = \frac{C_{12} \cdot C_{34}}{C_{12} + C_{34}}$.

$$C = \frac{2C \cdot 6C}{2C + 6C} = 1,5C.$$

Задача. Визначити різницю потенціалів між точками A і B.

Сума спадів напруги на конденсаторах C_1 і C_2 , C_3 і C_4 дорівнює ЕРС ξ , а заряди однакові.



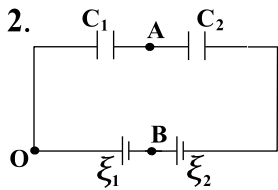
$$U_1 + U_2 = \xi, q_1 = q_2 \text{ або } C_1 U_1 = C_2 U_2$$

$$U_3 + U_4 = \xi, q_3 = q_4 \text{ або } C_3 U_3 = C_4 U_4.$$

$$\text{Звідси } U_1 = \frac{\xi}{1 + \frac{C_1}{C_2}} = \frac{\xi C_2}{C_1 + C_2} \text{ і } U_2 = \frac{\xi}{1 + \frac{C_2}{C_1}} = \frac{\xi C_1}{C_1 + C_2}.$$

Різниця потенціалів між точками А і В дорівнює:

$$U_4 - U_2 = U_1 - U_3 = \xi \frac{C_1 C_4 - C_2 C_3}{(C_1 + C_2)(C_3 + C_4)}$$



За нульовий потенціал приймаємо потенціал точки О.

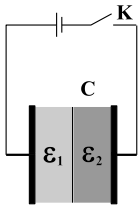
$$U_1 + U_2 = \xi_1 + \xi_2, \quad q_1 = q_2 \quad \text{або} \quad C_1 U_1 = C_2 U_2.$$

$$\text{Звідси } U_1 = \frac{(\xi_1 + \xi_2) C_2}{C_1 + C_2}.$$

Різниця потенціалів між точками В і А дорівнює

$$\xi_1 - U_1 = \frac{\xi_1 C_1 - \xi_2 C_2}{C_1 + C_2}.$$

3. Самостійно розв'язати задачі:



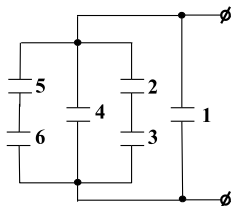
1. Плоский порожнистий конденсатор ємністю C , на якому підтримується стала різниця потенціалів U , розділили тонкою жорсткою перегородкою на дві частини і заповнили рідинами з діелектричними проникненостями ϵ_1 і ϵ_2 . Після розмикання ключа К діелектрик з проникненістю ϵ_2 витік. Визначити: а) заряд на обкладках конденсатора; б) сили, що діють на обкладки 1 і 2; в) тиск на перегородку.

Площа кожної обкладки дорівнює S .

$$\text{(Відповідь: а) } q = \frac{2\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} C U; \text{ б) } F_1 = \frac{q^2}{2\epsilon_1 \epsilon_0 S}, F_2 = \frac{q^2}{2\epsilon_0 S}; \text{ в) } p = \frac{F_2 - F_1}{S} = \frac{q^2(\epsilon_1 - 1)}{2\epsilon_1 \epsilon_0 S^2} \text{).}$$

2. Обкладки конденсатора з невідомою ємністю C_1 , зарядженого до напруги $U_1 = 80\text{В}$, з'єднують з обкладками конденсатора ємністю $C_2 = 60\text{мкФ}$, зарядженого до $U_2 = 16\text{В}$. Визначити ємність C_1 , якщо напруга на конденсаторах після їх з'єднання $U = 20\text{В}$. Конденсатори з'єднуються обкладками, що мають: а) однойменні заряди; б) різнойменні заряди.

$$\text{(Відповідь: а) } C_1 = C_2 \frac{U - U_2}{U_1 - U}, \text{ б) } C_1 = C_2 \frac{U + U_2}{U_1 - U} \text{).}$$



3. Ємність кожного конденсатора, з'єднаних у батарею, однакова і дорівнює C . Знайти ємність батареї конденсаторів.

(Відповідь: $2C$).

План заняття

I. Перевірка знання студентами понять: електроємність, конденсатор, енергія електричного поля.

II. Колективний аналіз логіки розв'язування однієї з домашніх задач.

III. Розв'язування задач:

1. Заряджений плоский конденсатор, простір між пластинами якого заповнено гасом ($\epsilon = 2$), розміщений вертикально і відключений від джерела напруги. Напруженість електричного поля при цьому в гасі $E = 2000 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Внаслідок дефекту в ізоляції гас починає витікати, а його місце займає повітря. Гранична напруженість електричного поля в повітрі, за якої настає електричний пробій $E_{\text{гр}} = 3000 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Яка частка гасу витече з конденсатора до його пробію?

$$\text{(Відповідь: } n = \frac{\epsilon \left(1 - \frac{E}{E_{\text{гр}}}\right)}{\epsilon - 1} = \frac{2}{3} \text{).}$$

2. Плоский повітряний конденсатор з відстанню між обкладками $d = 3\text{ см}$ і площею кожної з обкладок $S = 60\text{ см}^2$ під'єднали до джерела постійної напруги $U = 2\text{ кВ}$. Паралельно пластинам конденсатора вводиться металева пластина товщиною $d_0 = 1\text{ см}$. Знайти: а) Яку енергію витрачає джерело при внесенні пластини? На скільки змінюється при цьому енергія конденсатора? б) Яку роботу виконують сили поля і якою буде зміна енергії конденсатора, якщо пластину вставляти у заряджений конденсатор, від'єднаний від джерела?

(Відповідь: а) $A = \frac{\epsilon_0 S d_0 U^2}{d(d-d_0)} = 7 \cdot 10^{-6}\text{ Дж}$, $\Delta W = \frac{\epsilon_0 S d_0 U^2}{2d(d-d_0)} = 3,5 \cdot 10^{-6}\text{ Дж}$;

б) $A = \frac{\epsilon_0 S d_0 U^2}{2d^2} \approx 1,17 \cdot 10^{-6}\text{ Дж}$, $\Delta W = -\frac{\epsilon_0 S d_0 U^2}{2d^2} \approx -1,17 \cdot 10^{-6}\text{ Дж}$).

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

Розв'язування задач на застосування законів постійного струму

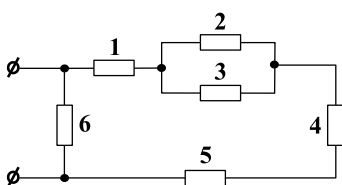
Підготовка до заняття

1. Пригадати зміст понять: електричний струм, сила струму, електрична напруга, електричний опір, закон Ома для ділянки кола, послідовне і паралельне з'єднання провідників. [, с. 72-75].

2. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач.

Задача. Визначити загальний опір електричного кола, якщо $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$.

1.



Розв'язування задач на обчислення опору складних з'єднань треба розпочинати з аналізу схеми і пошуку в ній провідників, з'єднаних один з одним послідовно або паралельно. При цьому весь час треба слідкувати за тим, що у випадку послідовного з'єднання струм між провідниками не розгалужується, а у випадку паралельного їх з'єднання – кінці з'єднувалися безпосередньо. У таких випадках ці провідники замінюють одним еквівалентним.

У розглядуваному колі R_4 і R_5 з'єднані послідовно. Еквівалентний їм опір

$$R_{45} = R_4 + R_5 = 2R.$$

Опори 2 і 3 з'єднані паралельно. Їх еквівалентний опір $R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R}{2}$.

Опори R_1 , R_{23} , R_{45} з'єднані послідовно. Еквівалентний їм опір $R' = R_1 + R_{23} + R_{45} = R + \frac{R}{2} + 2R = \frac{3}{2}R$.

Опори R' і R_6 з'єднані паралельно. Еквівалентний їм опір:

$$R_{\text{заг}} = \frac{R' \cdot R_6}{R' + R_6} = \frac{\frac{3}{2}R \cdot R}{\frac{3}{2}R + R} = \frac{3}{5}R.$$

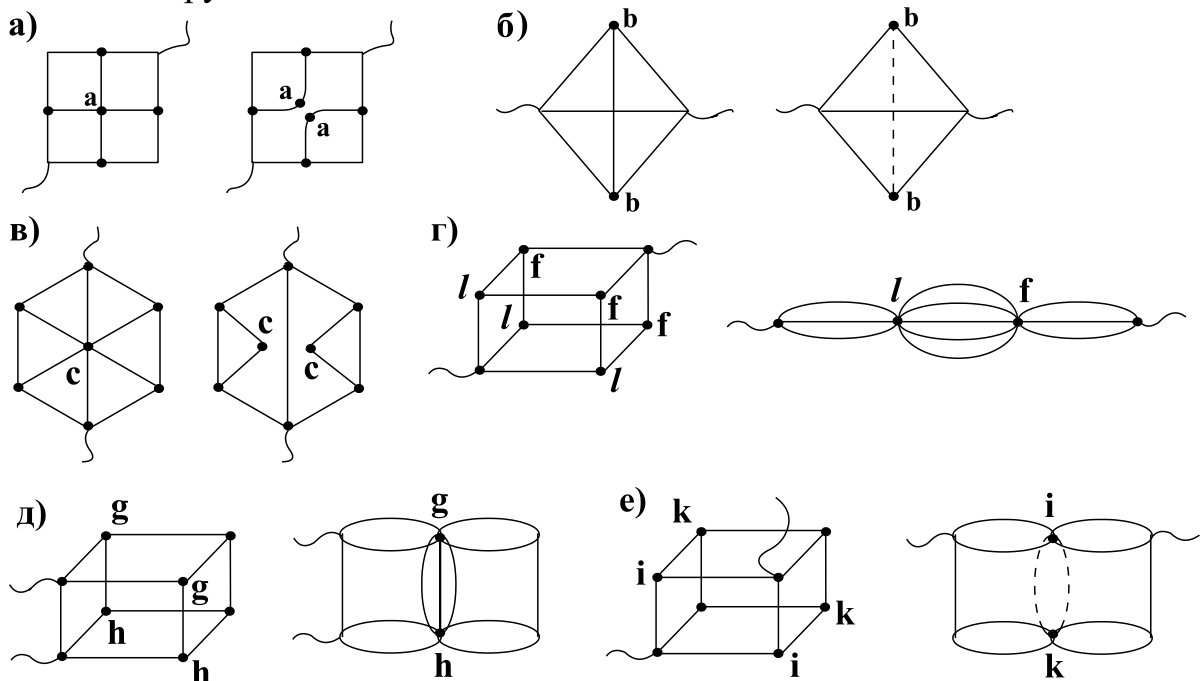
2. Якщо в схемі немає ні послідовного, ні паралельного з'єднання провідників, треба спробувати знайти точки з однаковими потенціалами. Такі точки завжди є в схемах, що мають вісь або площину симетрії відносно точок під'єднання джерела живлення.

Якщо схема симетрична відносно осі (площини), що проходить через точки входу і виходу струму (є повздовжня площина симетрії), то точки однакового потенціалу знаходяться на кінцях симетричних резисторів, оскільки по ним йдуть однакові струми.

Якщо схема симетрична відносно осі (площини), що проходить перпендикулярно лінії, на якій лежать точки входу і виходу струму – у схемі є поперечна вісь (площина) симетрії – то однаковий потенціал мають всі точки, що розташовані на перетині цієї осі (площини) з провідниками.

Точки з однаковими потенціалами, треба з'єднати їх (якщо вони були роз'єднані) або роз'єднати (якщо вони були з'єднані), після чого, як правило, можна отримати еквівалентну схему, складену із послідовно і паралельно з'єднаних резисторів.

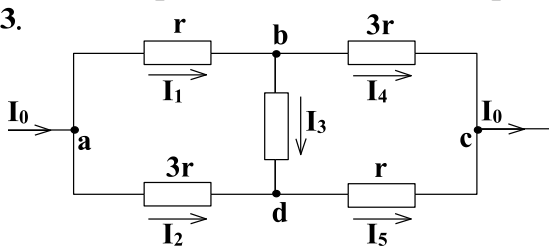
Яскраво це можна спостерігати на дротяних каркасах, складених з дротинок однакового опору:



На малюнках показано перехід до еквівалентних схем, враховуючи точки однакового потенціалу, що позначені буквами. В еквівалентних схемах є послі-

довне і паралельне з'єднання дротинки (резисторів).

3.



Коли в схемі немає послідовно і паралельно з'єднаних провідників, немає точок з рівними потенціалами, то задача розв'язується так:

1. Указують струми на кожному резисторі і вказують їх передбачуваний напрям.

прям.

2. Потім позначають через I_0 сумарний струм, що проходить через даний контур (він дорівнює струму, що підходить до контуру), складають рівняння струмів для кожної точки розгалуження (вузла). Сума струмів, які підходять до вузла, повинна дорівнювати сумі струмів, які виходять з нього.

3. Вибирають усі можливі шляхи проходження заряду між точками під'єднання контуру і складають для кожного з них рівняння падіння напруг типу $I_0 R_0 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots$, де R_0 – загальний опір, який треба визначити.

Ці рівняння складаються на підставі того, що падіння напруги $I_0 R_0$ на всьому контурі дорівнює алгебраїчній сумі падінь напруги на окремих резисторах, що з'єднують точки під'єднання контуру. Якщо на деякому провіднику, що входить у розглядувану частину кола, струм іде у напрямі, протилежному початковому струму ділянки, то падіння напруги на цьому провіднику беруть із знаком "мінус", в інших випадках – із знаком "плюс".

4. Число рівнянь струмів і напруг повинно бути на одне більше числа струмів, введених у розв'язок.

5. Виключивши з цих рівнянь всі струми, визначають R_0 .

Виконаємо ці дії до вказаної задачі.

Дана схема містить 4 вузли (точки a, b, c, d). Отримуємо 4 рівняння струмів:

$$\begin{cases} I_0 = I_1 + I_2 \\ I_1 = I_3 + I_4 \\ I_5 = I_2 + I_3 \\ I_0 = I_4 + I_5 \end{cases}$$

Ці рівняння містять 6 невідомих величин – усі струми, що введені у розв'язок.

Для контуру abc: $I_0 R_0 = I_4 r + I_4 3r$

Для контуру adc: $I_0 R_0 = I_2 3r + I_5 r$

Для контуру abdc: $I_0 R_0 = I_1 r + I_3 2r + I_5 r$

Для контуру adbc: $I_0 R_0 = I_2 3r - I_3 2r + I_4 3r$.

Розв'язуючи отриману систему рівнянь отримаємо: $R_0 = \frac{7}{4} r$.

Задача. Плоский конденсатор з пластинами квадратної форми розмірами $a^2 = 21 \times 21 \text{ см}^2$ і відстанню між пластинами $d = 2 \text{ мм}$ приєднаний до полюсів джерела з ЕРС $\xi = 750 \text{ В}$. У просторі між пластинами зі сталою швидкістю $v = 8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ вносять скляну пластину товщиною $d_1 = 2 \text{ мм}$. Який струм пройде при цьому по колу? Діелектрична проникненість скла $\epsilon = 7$.

$$I - ?$$

$$a^2 = 21 \times 21 \text{ см}^2$$

$$d = 2 \text{ мм}$$

$$d_1 = 2 \text{ мм}$$

$$\xi = 750 \text{ В}$$

$$v = 8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

$$\varepsilon = 7$$

Ця група задач ґрунтується на визначенні сили постійного електричного струму, згідно якому $I = \frac{q}{t}$, де q – заряд, який проходить через поперечний переріз провідника за час t .

У коло вміщено конденсатор, з'єднаний із джерелом постійної напруги $U = \xi$.

Зміна ємності конденсатора викликає зміну заряду на його пластинках. Цей заряд і проходить через з'єднувальні провідники. Змінювати ємність плоского конденсатора можна по-різному: змінювати площу пластин конденсатора, змінювати відстань між пластинами, змінювати діелектрик між обкладками конденсатора.

У даному випадку зміна ємності конденсатора відбувається за рахунок внесення у простір між обкладками скляної пластини.

Згідно умови задачі внесення пластини відбувається зі сталою швидкістю, отже ємність конденсатора і заряд на його обкладках змінюються за лінійним законом. Тому, щоб визначити силу струму, треба знайти зміну заряду конденсатора $\Delta q = q - q_0$, де q_0 – заряд конденсатора до внесення пластини, q – після внесення.

$$q = C \cdot \xi, C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, q_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \xi, q = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \xi, \Delta q = (\varepsilon - 1) \frac{\varepsilon_0 S}{d} \xi.$$

Час $t = \frac{a}{v}$, де a – відстань, яку проходить кінець пластини, що рухається між обкладками зі швидкістю v .

$$\text{Отже, } I = \frac{(\varepsilon - 1) \varepsilon_0 S v}{da} \xi = \frac{(\varepsilon - 1) \varepsilon_0 a v}{d} \xi, \text{ адже } S = a^2. I \approx 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ А.}$$

Задача. Різниця потенціалів між кінцями мідного дроту діаметром d і довжиною l дорівнює U . Як зміниться середня швидкість напрямленого руху електронів вздовж провідника, якщо збільшити вдвічі: а) U , б) l , в) d ?

У цій групі задач вихідною є формула зв'язку сили постійного струму з рухом вільних електронів. Згідно електронної теорії провідності металів $I = enSv_{\text{сєр}}$, де e – заряд електрона, n – концентрація вільних електронів, S – площа поперечного перерізу провідника. Водночас, $I = \frac{U}{R}$, $R = \rho \frac{l}{S}$.

$$\text{Отже, } \frac{US}{\rho l} = enSv_{\text{сєр}}, v_{\text{сєр}} = \frac{U}{en\rho l}.$$

Звідси видно, що при збільшенні U вдвічі, вдвічі збільшується $v_{\text{сєр}}$, при збільшенні вдвічі l – вдвічі зменшується $v_{\text{сєр}}$. Від $S = \frac{\pi d^2}{4}$ величина $v_{\text{сєр}}$ не залежить.

Задача. Якщо до амперметра, розрахованого на максимальну силу струму $I = 2 \text{ А}$, приєднати шунт опором $R_{\text{ш}} = 0,50 \text{ Ом}$, то ціна поділки шкали амперметра збільшиться у 10 разів. Визначити, який додатковий опір необхідно приєднати до того самого амперметра, щоб його можна було використовувати як вольтметр, що вимірює напругу до $U = 220 \text{ В}$?

$$R_0 - ?$$

$$I = 2 \text{ А}$$

$$R_{\text{ш}} = 0,50 \text{ Ом}$$

$$N = 10$$

$$U = 220 \text{ В}$$

Є група задач, пов'язаних із розрахунком шунтів та додаткових опорів до гальванометра.

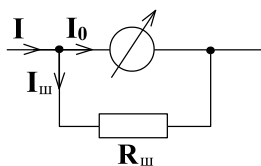
Амперметр являє собою прилад для вимірювання сили струму. Якщо шкала амперметра містить n_0 однакових поділок й роз-

рахована на максимальну силу струму I_0 , то при відхиленні стрілки амперметра на n поділок, через нього проходить струм $I = \frac{I_0}{n_0} n = C_i n$, де C_i – ціна однієї поділки.

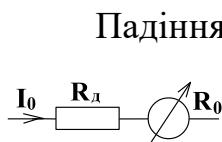
Для того щоб розширити межі вимірювання сили струму в N разів і виміряти струми до значень $I > I_0$, паралельно амперметру треба під'єднати шунт з опором $R_{ш} = \frac{I_0 R_0}{I - I_0} = \frac{R_0}{N - 1}$, де R_0 – внутрішній опір амперметра.

Вольтметр являє собою прилад для вимірювання напруги. Показ магнітоелектричного вольтметра дорівнює падінню напруги на опорі приладу: $U_B = I_B R_0$ і в той же час $U_B = \frac{U_0}{n_0} n = C_B n$, де U_0 – напруга на затискачах приладу, за якої стрілка відхиляється на всю шкалу, C_B – ціна поділки шкали вольтметра.

Для того щоб розширити межі вимірювання напруги в N разів і виміряти напругу до значень $U > U_0$, послідовно вольтметру треба під'єднати резистор з опором $R_d = \frac{U - U_0}{U_0} R_0 = (N - 1) R_0$, де R_0 – внутрішній опір вольтметра.



До амперметра під'єднали шунт, що дозволяє вимірювати силу струму $I = N \cdot I_0$: $R_{ш} = \frac{I_0 R_0}{N \cdot I_0 - I_0} = \frac{R_0}{N - 1}$. Опір амперметра (без додаткового шунта) $R_0 = (N - 1) R_{ш}$.

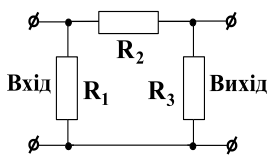


Падіння напруги на додатковому опорі U_d , а на приладі – $U_{пр}$. Загальне падіння напруги U . $U = U_{пр} + U_d$.

R_d і R_0 з'єднані послідовно, тому $\frac{U_d}{R_d} = \frac{U_{пр}}{R_0}$.

$$R_d = \frac{U_d}{U_{пр}} R_0 = \frac{U - I_0 R_0}{I_0 R_0} R_0 = \frac{U - I_0 (N - 1) R_{ш}}{I_0 R_0}$$

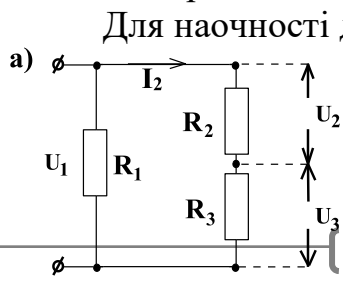
Через прилад не може проходити струм більше I_0 , тому при нарузі на створеному вольтметрі $U = 220V$, максимальна сила струму I_0 .



Задача. Якщо на вхід електричного кола подана напруга $U_1 = 100V$, то напруга на виході $U_3 = 40V$. При цьому через резистор R_2 іде струм $I_2 = 1A$. Якщо на вихід кола подати напругу $U'_3 = 60V$, то напруга на вході стане рівною $U'_1 = 15V$. Визначити опори резисторів R_1, R_2, R_3 .

У даній групі задач послідовно до одного, кількох, або разом до всіх споживачів (опорів) застосовується закон Ома для визначення відповідних фізичних величин – опорів, сил струмів, напруг, враховуючи закони послідовного і паралельного з'єднання провідників. Доцільно або використати схему кола, якщо вона задана, або подати її в іншому вигляді, з'ясувавши, які елементи увімкнуті послідовно, а які паралельно.

- $R_1 - ? R_2 - ? R_3 - ?$
- $U_1 = 100V$
- $U_3 = 40V$
- $I_2 = 1A$
- $U'_3 = 60V$
- $U'_1 = 15V$



Для наочності доцільно подати схему в іншому вигляді.

U_3 – напруга на резисторі R_3 . Резистори R_2 і R_3 увімкнуті послі-

довно, а разом – паралельно до R_1 .

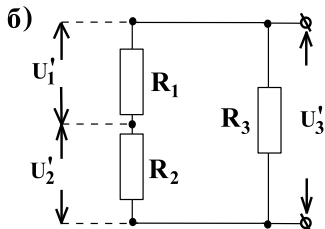
$$\text{Тому, } U_1 = U_2 + U_3, U_2 = U_1 - U_3.$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2}, R_2 = \frac{100-40}{1} = 60(\text{Ом}).$$

Через R_2 і R_3 проходить струм однакової сили I_2 .

$$\text{Отже, } R_3 = \frac{U_3}{I_2}, R_3 = 400\text{Ом}.$$

Аналогічно:



$$U'_3 = U'_1 + U'_2$$

$$U'_2 = U'_3 - U'_1$$

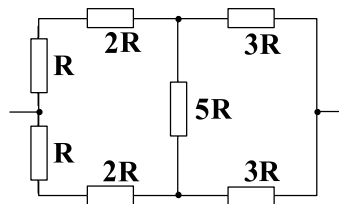
$$U'_2 = 45\text{В}.$$

Резистори R_1 і R_2 з'єднані послідовно, тому $\frac{U'_2}{U'_1} = \frac{R_2}{R_1}$.

$$\text{Звідси } R_1 = R_2 \frac{U'_1}{U'_2}, R_1 = 200\text{Ом}.$$

3. Самостійно розв'язати задачі:

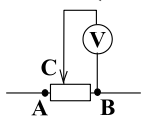
1. Визначити опір кола



(Відповідь: $3R$).

2. Гальванометр має опір 200Ом і при силі струму $100\mu\text{А}$ стрілка відхиляється на всю шкалу. Резистор якого опору треба підключити, щоб прилад можна було використовувати як вольтметр для вимірювання напруги до 2В ? Шунт якого опору треба підключити до цього гальванометра, щоб його можна було використовувати як міліамперметр для вимірювання сили струму до 10мА ?

(Відповідь: $19,8\text{кОм}$; $2,2\text{Ом}$).



3. До затискача В і ковзаючого контакту С реостата опором 600Ом підключено вольтметр. Коли довжина лівої (за малюнком) частини обмотки реостата удвічі більша за довжину правої частини, вольтметр показує 8В . Після переміщення контакту до кінця реостата у ліву (за малюнком) сторону вольтметр показав 28В . Знайти опір вольтметра. Напруга, що підведена до затискачів реостата стала.

(Відповідь: 800Ом).

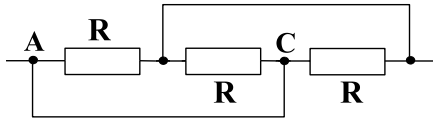
План заняття

I. Перевірка знання студентами понять: електричний струм, сила струму, електрична напруга, електричний опір, закон Ома для ділянки кола, послідовне і паралельне з'єднання провідників.

II. Колективний аналіз логіки розв'язування однієї з домашніх задач.

III. Розв'язування задач:

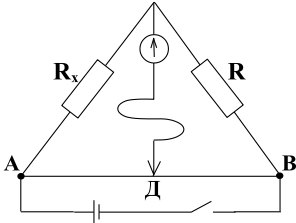
1. Чому дорівнює опір кола?



2. Якщо вольтметр з'єднати послідовно з резистором, опір якого $R = 10\text{кОм}$, то у разі напруги в колі $U = 120\text{В}$ він покаже $U_1 = 50\text{В}$. Якщо з'єднати його послідовно з резистором невідомого опору, то за тієї самої напруги він покаже $U_2 = 10\text{В}$. Визначити невідомий опір резистора.

(Відповідь: $R_x = R \frac{U_1(U-U_2)}{U_2(U-U_1)} = 72,6\text{кОм}$).

3. У мостовій схемі R – еталонний опір, R_x – опір мотка алюмінієвого дроту. При зануренні цього мотка у лід, що тане, міст стає зрівноваженим (через гальванометр струм не йде), якщо $AD = DB = 50\text{см}$. При зануренні ж мотка у киплячу воду, треба для зрівноваження містка перемістити контакт так, щоб $AD = 58\text{см}$ і $DB = 42\text{см}$. Обчислити за цими даними температурний коефіцієнт опору алюмінію.



(Відповідь: $0,0038\text{К}^{-1}$).

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

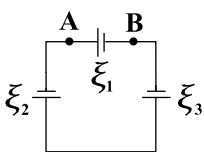
Контрольне заняття

ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Студент повинен уміти розв'язувати задачі типу:

1. При струмі $I_1 = 1,5\text{А}$ напруга на ділянці деякого кола $U_1 = 20\text{В}$. При струмі $I_2 = 0,5\text{А}$ напруга на цій ділянці кола $U_2 = 8\text{В}$. Яка ЕРС, що діє на цій ділянці? Якою буде напруга U_3 , якщо струм зменшити до $I_3 = 0,1\text{А}$?

(Відповідь: $\xi = \frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{I_1 - I_2} = 2\text{В}$; $U_3 = I_3 R + \xi = 3,2\text{В}$)



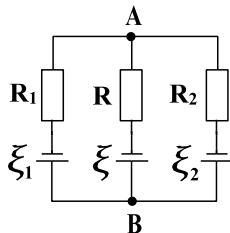
2. У схемі увімкнуті три батареї ($\xi_1 = 1\text{В}$, $\xi_2 = 4\text{В}$, $\xi_3 = 2\text{В}$, $r_1 = 10\text{м}$, $r_2 = 20\text{м}$, $r_3 = 30\text{м}$). Знайти напругу на затискачах першої батареї. Опором з'єднувальних проводів нехтувати.

(Відповідь: $\varphi_A - \varphi_B = 0,5\text{В}$)

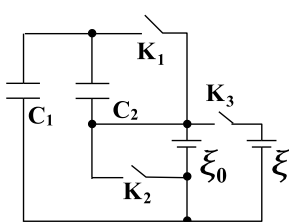
3. Акумулятор під'єднано для зарядки до батареї, що має ЕРС $\xi_0 = 12,5\text{В}$. Внутрішній опір акумулятора $r_a = 10\text{Ом}$. Під час зарядки через акумулятор проходить струм $I = 0,5\text{А}$. Визначити ЕРС акумулятора.

(Відповідь: 12В)

4. Визначити, за якого значення ξ струм через R дорівнюватиме нулю. Внутрішніми опором джерел струму нехтувати.



(Відповідь: $\xi = \frac{\xi_2 R_1 + \xi_1 R_2}{R_1 + R_2}$)



5. У схемі спочатку всі ключі розімкнуті. Конденсатори з ємностями C_1 і C_2 розряджені. ЕДС батарей ξ_0 і ξ . Потім виконуються перемикання: 1) замикаються ключі K_1 і K_2 ; 2) потім, через деякий час ключі K_1 і K_2 розмикають, а ключ K_3 замикають. Знайти заряди на конденсаторах після вказаних перемикань.

6. Від джерела з напругою 110В необхідно передати корисну потужність 5кВт на деяку відстань. Який найбільший опір може мати лінія електропередач, щоб втрата енергії в ній не перевищувала 10% від споживаної корисної потужності?

(Відповідь: $R = \frac{0,1}{P} \left(\frac{U}{1,1} \right)^2 = 0,2\text{Ом}$)

7. Акумулятор, заряджений до ЕРС $\xi = 12\text{В}$, увімкнули для заряджання в мережу з напругою $U_M = 15\text{В}$. Який додатковий опір R треба увімкнути в коло, щоб сила зарядного струму не перевищила $I_3 = 1\text{А}$? Внутрішній опір акумулятора $r = 20\text{Ом}$.

(Відповідь: $R = \frac{U_M - \xi - Ir}{I} = 10\text{Ом}$)

8. Дві електричні лампочки увімкнули в мережу спочатку послідовно, а потім паралельно. Опір першої лампочки $R_1 = 3600\text{Ом}$, другої – $R_2 = 2400\text{Ом}$. Яка з лампочок споживатиме більшу потужність і в скільки разів у першому й другому випадках?

(Відповідь: У першому випадку перша лампочка споживатиме у 1,5 рази більшу потужність ніж друга, а в другому – друга лампочка споживає у 1,5 рази більшу потужність ніж перша)

9. Елемент із внутрішнім опором $r = 40\text{Ом}$ і ЕРС $\xi = 12\text{В}$ змкнули провідником опір якого $R = 80\text{Ом}$. Яка кількість теплоти Q буде виділятися у зовнішній частині кола за 1с?

(Відповідь: $\frac{Q}{t} = \frac{\xi^2 R}{(R+r)^2} = 3 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$)

10. ЕРС батареї $\xi = 12\text{В}$, сила струму короткого замикання $I_0 = 5\text{А}$. Яку найбільшу потужність може дати батарея у зовнішньому колі?

(Відповідь: $P_{max} = \frac{I_0 \xi}{4} = 15 \text{ Вт}$)

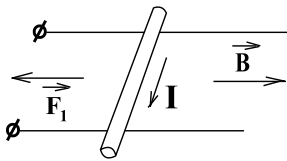
11. Провід, маса якого $m = 3 \text{ г}$ і довжина $l = 10 \text{ см}$, висить на двох однакових вертикальних пружинах. Система міститься в постійному магнітному полі, індукція якого дорівнює $B = 1 \text{ Тл}$ і напрямлена вертикально вгору. На скільки зміниться натяг пружинки, якщо в проводі йтиме струм силою $I = 2 \text{ А}$?

(Відповідь: $\Delta F = \frac{1}{2} [\sqrt{(mg)^2 + (BIl)^2} - mg] \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$)

12. Стержень, довжина якого l і маса m , підвішений на двох легеньких дротинах однакової довжини. Дротики закріплені на кінцях стержня і паралельні одна одній. Система міститься в однорідному вертикальному магнітному полі з індукцією \vec{B} . Чому дорівнюватиме натяг кожної дротини, якщо в стержні йтиме струм силою I ?

(Відповідь: $F_H = \frac{1}{2} \sqrt{(mg)^2 + (BIl)^2}$)

13. Провід, маса якого $m = 0,2 \text{ кг}$, а довжина $l = 0,6 \text{ м}$, лежить на горизонтальних рейках, розміщених в горизонтальному магнітному полі з індукцією $B = 0,1 \text{ Тл}$. Якщо в проводі йде струм $I = 20 \text{ А}$ у вказаному на малюнку напрямі, то щоб зрушити провід вліво, треба прикласти горизонтальну силу $F_1 = 0,5 \text{ Н}$. Яку силу треба прикласти, якщо напрям струму зміниться на протилежний?



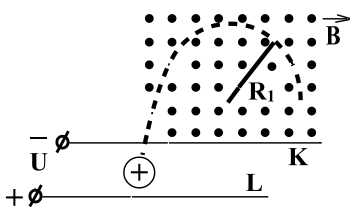
(Відповідь: $F_2 = F_1 \frac{mg + BIl}{mg - BIl} = 2 \text{ Н}$)

14. У напрямі, перпендикулярному лініям індукції влітає в магнітне поле електрон зі швидкістю $10 \frac{\text{Мм}}{\text{с}}$. Знайти індукцію поля, якщо електрон описує в полі коло радіусом 1 см .

(Відповідь: $5,6 \text{ мТл}$)

15. Електрон, який має швидкість v , потрапляє в однорідне магнітне поле, індукція якого \vec{B} складає кут α з \vec{v} . Визначити радіус кола, що описує електрон і крок гвинтової лінії.

(Відповідь: $R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}$)

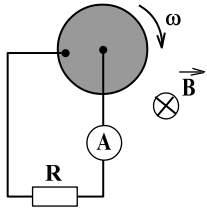


16. У мас-спектрографі заряджені частинки прискорюються на ділянці КЛ електричним полем і, потрапивши у магнітне поле з індукцією B , описують коло радіусом R . Вивести формулу для розрахунку питомого заряду частинки $\frac{q}{m}$, якщо прискорююча напруга дорівнює U , а початкову швидкість частинки вважати рівною нулю.

(Відповідь: $\frac{q}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}$)

17. Між рейками залізниці увімкнули вольтметр. Над ним зі сталою швидкістю проходить потяг. Якими будуть покази вольтметра з наближенням потягу, в момент знаходження його над вольтметром і з віддаленням? Магнітне поле Землі на цій ділянці вважати однорідним, вертикальна складова його $B_v = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$. Ширина колії $l = 1,2 \text{ м}$. Швидкість потягу $v = 60 \frac{\text{км}}{\text{год}}$.

(Відповідь: $U = B_{\text{в}} l v \approx 10^{-3} \text{В}$)



18. Металевий круг, радіус якого дорівнює R , обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю ω . Визначити покази вольтметра, з'єданого з контактами, один з яких дотикається до круга в центрі, а другий – біля краю. Відношення заряду електрона до його маси дорівнює γ . Опір вольтметра вважати дуже великим.

(Відповідь: $U = \frac{\omega^2 R^2}{2\gamma}$)

19. Описати спосіб (логіку) розв'язування навчальних задач в циклах навчального процесу з введення таких понять:

- Електроємність. Конденсатори;
- Закон Ома для повного кола;
- Сила Лоренца.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

Розв'язування задач на застосування законів постійного струму

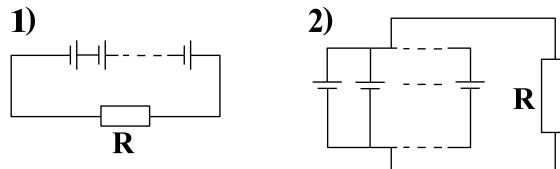
(З'єднання джерел струму. Закон Ома для повного кола.)

Підготовка до заняття

1. Пригадати зміст понять: джерела електричного струму, електрорушійна сила, закон Ома для повного кола. [, с. 72-79].

2. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач.

Задача. Є дві батареї, одна з яких складена з декількох однакових гальванічних елементів, з'єднаних послідовно, інша – з такого ж числа таких самих елементів, з'єднаних паралельно. На які резистори однакового опору треба замкнути кожну з батарей, щоб струм в них був однаковий? Внутрішній опір кожного гальванічного елемента дорівнює r_0 . Опором з'єднувальних провідників знехтувати.



При послідовному з'єднанні джерел струму ЕРС всієї батареї дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС окремих джерел: $\xi_{\text{зар}} = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n$. Якщо $\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_n = \xi$, то $\xi_{\text{зар}} = n\xi$.

Внутрішній опір батареї $r_{\text{зар}} = r_1 + r_2 + \dots + r_n$.

За умови, що однакові джерела струму з'єднані послідовно і замкнені на резистор опором R , то сила струму в колі дорівнює: $I = \frac{n\xi}{R+nr}$.

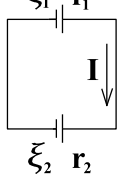
При паралельному з'єднанні декількох джерел струму батарею акумуляторів можна замінити одним джерелом, яке буде створювати у зовнішньому колі опором R такий самий струм, як і дана батарея. Внутрішній опір r і ЕРС еквівалентного джерела струму можна визначити за формулами:

$$\frac{1}{r_{\text{зар}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n} \quad \text{і} \quad \frac{\xi_{\text{зар}}}{r_{\text{зар}}} = \frac{\xi_1}{r_1} + \frac{\xi_2}{r_2} + \dots + \frac{\xi_n}{r_n}$$

При паралельному з'єднанні n однакових джерел однойменними полюсами сила струму в колі дорівнює: $I = \frac{\xi}{R+\frac{r}{n}} = \frac{n\xi}{r+nR}$.

Отже, у даній задачі можна записати: $\frac{n\xi}{R+nr} = \frac{n\xi}{r+nR}$. Звідси випливає, що $R = r$. В обох випадках зовнішній опір повинен дорівнювати внутрішньому опору одного з джерел струму.

Задача. Є два гальванічних елементи з ЕРС ξ_1 і ξ_2 і внутрішніми опорами r_1 і r_2 відповідно. Знайти напругу на їх затискачах за умов, що елементи з'єднані паралельно і: а) $\xi_1 > \xi_2$ і $r_1 = r_2$; б) $\xi_1 > \xi_2$ і $r_1 < r_2$.

а)  Напруга на затискачах елементів однакова $U = \xi_1 - Ir$ (напрямок струму збігається з напрямком струму, що створило джерело ξ_1).
 $U = \xi_2 + Ir$ (напрямок струму протилежний напрямку струму, що створило джерело ξ_2).
 Отже, $U = \frac{\xi_2 + \xi_1}{2}$.

б) Перший спосіб аналогічний попередньому:

$$U = \xi_1 - Ir_1, \quad U = \xi_2 + Ir_2$$

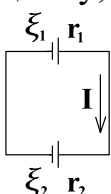
$$\xi_1 - Ir_1 = \xi_2 + Ir_2, \quad I = \frac{\xi_1 - \xi_2}{r_1 + r_2}$$

$$U = \xi_1 - \frac{\xi_1 - \xi_2}{r_1 + r_2} \cdot r_1 = \xi_2 + \frac{\xi_1 - \xi_2}{r_1 + r_2} \cdot r_2 = \frac{\xi_1 r_2 + \xi_2 r_1}{r_1 + r_2}$$

Другий спосіб.

Спочатку визначається сила струму в контурі $I = \frac{\xi}{R+r}$.

Загальна ЕРС контуру визначається сумою ЕРС окремих джерел. При цьому, ЕРС джерел, які створюють струм того самого напрямку, що має струм в колі, беруть із знаком "плюс", а ЕРС джерел, які створюють струм протилежного напрямку – беруть із знаком "мінус".

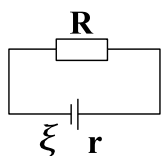


Загальна ЕРС, що діє в колі, дорівнює $\xi_1 - \xi_2$.

Опір кола $r_1 + r_2$. Тому, за законом Ома, струм в колі $I = \frac{\xi_1 - \xi_2}{r_1 + r_2}$, а напруга на затискачах джерела $U = \xi_2 - Ir_2 = \frac{\xi_1 r_2 + \xi_2 r_1}{r_1 + r_2}$.

Задача. Визначити внутрішній опір акумулятора, якщо відомо, що при замиканні його на зовнішній опір $R_1 = 10\text{Ом}$ напруга на затискачах акумулятора $U_1 = 2\text{В}$, а при замиканні на опір $R_2 = 20\text{Ом}$ напруга на затискачах $U_2 = 2,4\text{В}$. Опором з'єднувальних провідників знехтувати.

$r = ?$
 $R_1 = 10\text{Ом}$
 $U_1 = 2\text{В}$
 $R_2 = 20\text{Ом}$
 $U_2 = 2,4\text{В}$



У задачах аналогічних даних безпосередньо використовується закон Ома для повного кола. У таких задачах бажано вибрати найбільш раціональний для даної ситуації запис закону, враховуючи такі варіанти:

$$I = \frac{\xi}{R+r}, \quad \xi = IR + Ir, \quad \xi = U_{\text{зовн}} + U_{\text{внутр}} \text{ тощо.}$$

У цій задачі зручно скористатися такою формулою

$$\xi = U_{\text{зовн}} + Ir.$$

Розглядаються два випадки. ξ і r не змінюються.

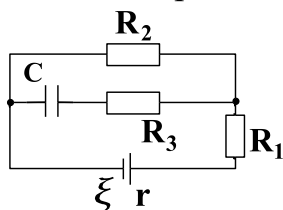
Силу струму у кожному випадку знаходимо із закону Ома для ділянки кола, адже відомо падіння напруги на зовнішньому колі (яке складається з одного резистора) і опір резистора.

$$\begin{cases} \xi = U_1 + I_1 r \\ \xi = U_2 + I_2 r \\ I_1 = \frac{U_1}{R_1} \\ I_2 = \frac{U_2}{R_2} \end{cases}$$

Розв'язуючи систему рівнянь одержимо:

$$r = \frac{U_2 - U_1}{U_1 R_2 - U_2 R_1} R_1 R_2, \quad r = 0,5\text{Ом.}$$

Задача. До якої різниці потенціалів заряджається конденсатор С? $\xi = 3,6\text{В}$,



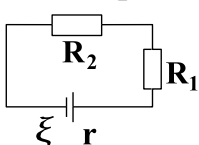
$$r = 1\text{Ом}, \quad R_1 = 40\text{Ом}, \quad R_2 = 70\text{Ом}, \quad R_3 = 30\text{Ом.}$$

Джерело заряджає конденсатор до певної напруги U . Після цього струм через резистор R_3 не йде, а продовжує йти через резистори R_1 і R_2 .

Коли струм у колі конденсатора припиняється, падіння напруги на резисторі R_3 дорівнює нулю і напруга на конденсаторі дорівнюватиме напрузі на R_2 .

Отже, треба знайти падіння напруги на R_2 .

Враховуючи, що струм через R_3 не проходить, коло можна зобразити так:



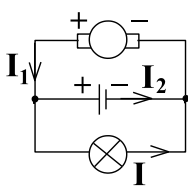
$$\text{Сила струму в колі } I = \frac{\xi}{R_1 + r + R_2}.$$

$$\text{Падіння напруги на } R_2: U = IR_2 = \frac{\xi R_2}{R_1 + r + R_2}.$$

Різниця потенціалів на конденсаторі така сама.

Задача. Динамомашина створює ЕРС $\xi_1 = 12\text{В}$, її внутрішній опір $r_1 = 0,2\text{Ом}$. За її допомогою заряджають акумуляторну батарею з ЕРС $\xi_2 = 10\text{В}$ і внутрішнім опором $r_2 = 0,6\text{Ом}$. Паралельно батареї увімкнута лампочка з опором $R = 3\text{Ом}$. Визначити силу струму в батареї і лампочці.

$$\begin{array}{l} I_2 - ? I - ? \\ \xi_1 = 12\text{В} \\ r_1 = 0,2\text{Ом} \\ \xi_2 = 10\text{В} \\ r_2 = 0,6\text{Ом} \\ R = 3\text{Ом} \end{array}$$



Для зарядки акумулятора його позитивний полюс з'єднують із позитивним полюсом динамомашини, негативний – з негативним.

ЕРС генератора (динамомашини) більша за ЕРС акумулятора і струм через акумулятор йде у напрямку протилежному напрямку струму, який акумулятор створює під час розрядки.

Напруга на полюсах генератора U_1 дорівнює різниці ЕРС ξ_1 і падіння напруги всередині генератора $U = \xi_1 - I_1 r_1$.

Напруга на батареї дорівнює сумі ЕРС ξ_2 і падіння напруги всередині батареї $U = \xi_2 + I_2 r_2$.

Падіння напруги на лампочці $U = IR$.

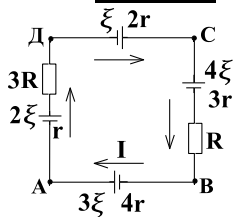
Генератор, батарея, лампочка увімкнуті паралельно $I_1 = I + I_2$.

Отже, отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} U = \xi_1 - I_1 r_1 \\ U = \xi_2 + I_2 r_2 \\ U = IR \\ I_1 = I + I_2 \end{cases}$$

Звідси випливає: $I_2 = \frac{(\xi_1 - \xi_2)R - \xi_2 r_1}{r_1 r_2 + (r_1 + r_2)R}$, $I_2 \approx 1,6\text{А}$; $I = \frac{\xi_1 r_2 + \xi_2 r_1}{r_1 r_2 + (r_1 + r_2)R}$, $I \approx 3,6\text{А}$.

Задача. Визначити різницю потенціалів між точками А і С.



У даній групі задач використовується закон Ома для ділянки кола, яка містить джерело струму.

Описаний спосіб розв'язування задачі можна використати для визначення різниці потенціалів між двома будь-якими точками кола.

1. Визначимо загальну ЕРС всього контуру $\xi_0 = \xi + 2\xi + 3\xi - 4\xi = 2\xi$.

Джерело з ЕРС 4ξ увімкнуте назустріч іншим джерелам, у яких загальне ЕРС більша 4ξ .

2. Визначаємо силу струму: $I = \frac{2\xi}{3R + 10r}$.

3. Закон Ома для ділянки кола, яка містить джерело струму:

$$I_d = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \xi_d}{r_d}$$

Різниця потенціалів на ділянці кола дорівнює: $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \xi_d \pm I_d r_d$, де φ_1 і φ_2 – потенціали початку і кінця ділянки у напрямі струму через джерело, ξ_d – загальна ЕРС ділянки, I_d і r_d – сила струму і повний опір ділянки.

Застосуємо закон Ома для ділянки АВС:

$$\xi_{ABC} = 4\xi - 3\xi = \xi, R_{ABC} = R + 7r, U_{AC} = \xi + I(R + 7r)$$

Перед добутком сили струму на опір стоїть знак "плюс", враховуючи, що

по ділянці йде струм не у напрямі, в якому його створило джерело з ЕРС цієї ділянки.

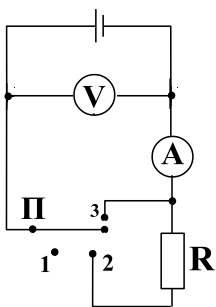
$$\text{Отже, } U_{AC} = \frac{3R+24r}{3R+10r} \cdot \xi.$$

Такий самий результат можна отримати, розглядаючи ділянку АДС:

$$\xi_{АДС} = 3\xi, R_{АДС} = 2R + 3r, U_{AC} = 3\xi - I(2R + 3r) = \frac{3R+24r}{3R+10r} \cdot \xi.$$

Перед $I(2R + 3r)$ стоїть знак "мінус", адже напрям струму збігається з напрямом струму, який створює джерело з ЕРС цієї ділянки.

Задача. Визначити покази амперметра і вольтметра для положень 1 і 2 перемикача П. ЕРС джерела $\xi = 1,5\text{В}$, його внутрішній опір $r = 0,5\text{Ом}$; опір резистора $R = 2,5\text{Ом}$. Опір амперметра і підвідних проводів мізерно малий, а опір вольтметра дуже великий. Якими будуть покази амперметра і вольтметра, якщо перемикач буде на контакті 3?



Перемикач в положенні 1.

Коло розімкнене, тому сила струму дорівнює нулю. Покази вольтметра збігаються із значенням ЕРС джерела $\xi = 1,5\text{В}$ (опір вольтметра дуже великий).

Перемикач в положенні 2.

Струм проходить через резистор R . Сила струму в колі (покази амперметра):

$$I = \frac{\xi}{R+r}; I = \frac{1,5}{0,5+2,5} = 0,5(\text{А}).$$

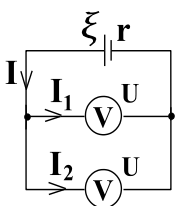
Вольтметр покаже падіння напруги на зовнішньому колі $U = \xi - Ir$, $U = 1,5 - 0,25 = 1,25(\text{В})$.

Перемикач в положенні 3.

Джерело замкнене накоротко (опори амперметра і проводів мізерно малі). Напруга у зовнішньому колі (покази вольтметра) дорівнює нулю. Амперметр вимірює силу струму короткого замикання

$$I = \frac{\xi}{r}, I = \frac{1,5}{0,5} = 3(\text{А}).$$

Задача. Якщо до джерела ЕРС під'єднати два однакові вольтметри, з'єднавши їх паралельно чи послідовно, то вольтметри показують однакову напругу $U = 8\text{В}$. Визначити ЕРС джерела.



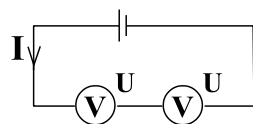
За законом Ома для повного кола $\xi = U + 2I_1r$, $I_1 = \frac{U}{R_B}$. Отже, $\xi = U + \frac{2U}{R_B}r$.

Вольтметр показує падіння напруги на самому приладі і на відповідному паралельному з'єднанні з ним ділянки кола.

$$\text{Для даного випадку } \xi = 2U + Ir, I = \frac{U}{R_B}.$$

$$\text{Отже } \xi = 2U + \frac{U}{R_B}r.$$

Визначивши з обох рівнянь r і прирівнявши, отриманий



результат можна записати $\frac{\xi - U}{2U} R = \frac{\xi - 2U}{U} R$.

Звідси $\xi = 3U$.

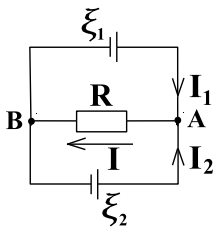
3. Самостійно розв'язати задачі:

1. Вольтметр, під'єднаний до джерела струму з ЕРС $\xi = 12\text{В}$, показує напругу $U = 9\text{В}$. До клем джерела під'єднали ще один такий самий вольтметр. Визначити покази вольтметра.

(Відповідь: $U = \frac{\xi U}{2\xi - U} = 7,2\text{В}$).

2. Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму до його клем під'єднали реостат. При одному положенні повзунка реостата сила струму в колі була $I_1 = 1,5\text{А}$, а напруга $U_1 = 4,5\text{В}$, при другому – $I_2 = 2\text{А}$, $U_2 = 3\text{В}$. Знайти ЕРС джерела і його внутрішній опір.

(Відповідь: $\xi = 9\text{В}$, $r = 30\text{Ом}$).



3. У колі увімкнені два елемента з ЕРС $\xi_1 = \xi_2 = 2\text{В}$ і внутрішніми опором $r_1 = 10\text{Ом}$ і $r_2 = 20\text{Ом}$. Визначити опір R , якщо $I_1 = 1\text{А}$. Визначити також I і I_2 .

(Відповідь: $\frac{2}{3}\text{Ом}$; $1,5\text{А}$).

План заняття

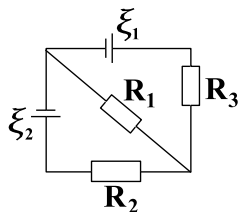
I. Перевірка знання студентами понять: джерела електричного струму, електрорушійна сила, закон Ома для повного кола.

II. Колективний аналіз логіки розв'язування однієї з домашніх задач.

III. Розв'язування задач:

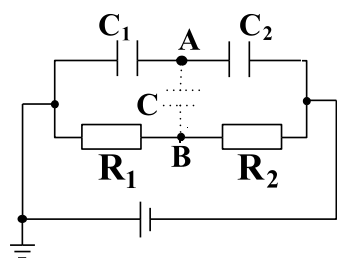
1. Два елемента з ЕРС $\xi_1 = 2\text{В}$ і $\xi_2 = 1\text{В}$ з'єднані паралельно (однаковими полюсами) і замкнені на резистор опором R . Внутрішні опори цих елементів дорівнюють відповідно $r_1 = 10\text{Ом}$ і $r_2 = 20\text{Ом}$. Чому дорівнює R , якщо струм I_1 , що проходить через перший елемент, дорівнює 1А ? Знайти силу струму I_2 , що проходить через другий елемент, а також силу струму, що проходить через R .

(Відповідь: $R = 10\text{Ом}$; $I_2 = 0$; $I_R = 1,5\text{А}$).



2. У колі $\xi_1 = 2\text{В}$, $\xi_2 = 2,4\text{В}$, $R_1 = 500\text{Ом}$, $R_2 = 100\text{Ом}$, $R_3 = 150\text{Ом}$. Визначити силу струму в кожній ділянці кола. Внутрішнім опором джерел знехтувати.

(Відповідь: $0,04\text{А}$; 0 ; $0,04\text{А}$).



3. Визначити різницю потенціалів між точками А і В у колі. ЕРС джерела ξ , внутрішнім опором можна знехтувати. Який заряд мав би конденсатор ємністю C при включенні його між точками А і В?

(Відповідь: $\varphi_A - \varphi_B = \frac{\xi(C_2 R_2 - C_1 R_1)}{(C_1 + C_2)(R_1 + R_2)}$;

$q = \frac{C\xi(C_2 R_2 - C_1 R_1)}{(C_1 + C_2)(R_1 + R_2)}$).

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7
Розв'язування задач на застосування
законів постійного струму
(Робота і потужність постійного струму)

Підготовка до заняття

1. Пригадати зміст понять: закон Джоуля-Ленца, робота і потужність електричного струму. [, с. 75].

2. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач.

Задача. Визначити ЕРС і внутрішній опір джерела струму, якщо при силі струму $I_1 = 2\text{А}$ у зовнішньому колі виділяється потужність $P_1 = 3\text{Вт}$, а при силі струму $I_2 = 4\text{А}$ – потужність $P_2 = 4\text{Вт}$.

$\xi - ? r - ?$
 $I_1 = 1\text{А}$
 $P_1 = 3\text{Вт}$
 $I_2 = 4\text{А}$
 $P_2 = 4\text{Вт}$

У цієї групи задач використовуються розглянуті на поперед-

ньому заняті способи застосування закону Ома для повного і ділянки кола, додаючи формули потужності:

1. Під час проходження заряду q ділянкою кола електричне поле виконує над зарядом роботу: $A = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$.

Перші дві формули застосовуються для будь-якої ділянки кола опором R , на кінцях якої підтримується різниця потенціалів U , останні дві – коли на ділянці немає ЕРС.

2. Робота струму за одиницю часу – потужність струму дорівнює:

$$P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

3. Якщо джерело з ЕРС ξ і внутрішнім опором r замкнено на резистор R , то повна потужність, що розвивається джерелом, дорівнює:

$$P_0 = I\xi = I^2(R+r) = \frac{\xi^2}{R+r}.$$

У зовнішній ділянці кола при цьому виділяється потужність:

$$P = IU = \frac{U^2}{R} = I\xi - I^2r = \frac{\xi^2 R}{(R+r)^2}, \text{ де } I \text{ – сила струму в колі, } U \text{ – напруга на}$$

затискачах джерела.

У даній задачі розглядаються два випадки:

$$\xi = IR + Ir, \text{ але } R = \frac{P}{I^2}, \text{ отже } \xi = \frac{P}{I^2} + Ir.$$

$$\text{Для першого випадку: } \xi = \frac{P_1}{I_1^2} + I_1 r.$$

$$\text{Для другого випадку: } \xi = \frac{P_2}{I_2^2} + I_2 r.$$

$$\text{Звідси: } \xi = \frac{P_1 I_2^2 - P_2 I_1^2}{I_1 I_2 (I_2 - I_1)}; \xi = 2R; r = \frac{\xi I_1 - P_1}{I_1^2}; r = 0,250 \text{ м.}$$

Задача. Напруга на шинах електростанції дорівнює $U_0 = 10 \text{ кВ}$, відстань до споживача $l = 500 \text{ км}$. Станція повинна передавати споживачу потужність $P = 100 \text{ кВт}$. Втрати напруги у проводах не повинні перевищувати $z = 4\%$. Обчислити масу мідних проводів на ділянці електростанція-споживач. Якою повинна бути маса проводів, якщо напругу збільшити вдвічі?

$m = ?$

$$U_0 = 10 \text{ кВ}$$

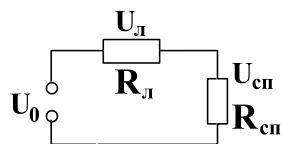
$$l = 500 \text{ км}$$

$$P = 100 \text{ кВт}$$

$$z = 4\%$$

$$D_{\text{мідь}} = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{\text{мідь}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$



На схемі відмічено: опір споживача $R_{\text{сп}}$, опір проводів лінії електропередач $R_{\text{л}}$, напруги на цих резисторах, напруга на шинах електростанції U_0 .

Вихідна формула для визначення маси: $m = DV$, об'єм проводів $V = 2lS$, їх опір $R = \rho \frac{2l}{S}$, отже $m = \frac{4D\rho l^2}{R}$.

З накресленої схеми видно, що $U_0 = U_{\text{сп}} + U_{\text{л}}$.

$$U_{\text{л}} = IR, U_{\text{л}} = \frac{z}{100\%} U_0, P = IU_{\text{сп}}$$

Визначаючи з цих формул R і підставляючи його вираз у вихідну форму-

лу, отримаємо: $m = \frac{4D\rho l^2 P}{\left(1 - \frac{z}{100\%}\right)U_0^2}$; $m = 3,94 \cdot 10^6$ кг.

З отриманого виразу видно, що маса проводів обернено пропорційна квадрату напруги на шинах електростанції, тому при збільшенні напруги у 2 рази масу проводів лінії можна зменшити у 4 рази.

Задача. Визначити роботу електричних сил і кількість теплоти, що виділяється за $t = 1$ с у таких випадках: а) у проводі, по якому йде струм $I = 1$ А, напруга між кінцями проводу дорівнює $U = 2$ В; б) в акумуляторі, який заряджається струмом $I_1 = 1$ А, різниця потенціалів між полюсами акумулятора дорівнює $U_1 = 2$ В, ЕРС акумулятора $\xi = 1,3$ В; в) в батареї акумуляторів, яка дає струм $I_2 = 1$ А на зовнішній опір, різниця потенціалів між полюсами акумулятора $U_2 = 2$ В, ЕРС батареї $\xi_2 = 2,6$ В.

A-?Q-?

$$t = 1 \text{ с}$$

$$I = 1 \text{ А}$$

$$U = 2 \text{ В}$$

$$I_1 = 1 \text{ А}$$

$$U_1 = 2 \text{ В}$$

$$\xi = 1,3 \text{ В}$$

$$I_2 = 1 \text{ А}$$

$$U_2 = 2 \text{ В}$$

$$\xi_2 = 2,6 \text{ В}$$

В одній групі задач, до якої відносяться попередні задачі, формули роботи, потужності струму, кількості теплоти є допоміжними. В іншій групі задач, до якої відноситься і дана задача, зазначені формули є основними.

Але, у всіх випадках треба враховувати наступне:

1) аналізуючи умову задачі, необхідно, перш за все, з'ясувати, чи мова йде про потужність, яка виділяється на ділянці кола, чи про повну потужність або про потужність у зовнішньому колі і скористатися відповідними формулами (див. першу задачу);

2) потужність, що виділяється у зовнішньому колі буде максимальною за умови рівності опору зовнішнього кола і опору

джерела.

У даній задачі треба визначити роботу електричних сил і кількість теплоти, що виділяється.

Повна робота електричних сил $A = IUt$, де U – у загальному випадку різниця потенціалів. Кількість теплоти $Q = I^2 Rt$.

а) $A = Q = IUt$; $A = Q = 2$ Дж.

б) $A = IUt$; $A = 2$ Дж. Для того щоб визначити Q , треба визначити внутрішній опір акумулятора за законом Ома, записаного для даного випадку, $I_1 r = U_1 - \xi$ (струм йде проти ЕРС), звідси $Q = I_1 (U_1 - \xi) t$; $Q = 0,7$ Дж.

в) Роботу виконує ЕРС акумулятора. Робота ж електричних сил на внутрішній ділянці кола від'ємна: $A = -I_2 U_2 t$; $A = -2$ Дж (струм йде від меншого потенціалу до більшого).

Кількість теплоти $Q = I_2^2 Rt$, де $R = \frac{\xi_2 - U_2}{I_2}$.

Отже, $Q = I_2 (\xi_2 - U_2) t$; $Q = 0,6$ Дж.

Задача. Електродугова піч споживає струм силою $I = 200$ А від мережі, напруга в якій $U = 220$ В. Послідовно з піччю увімкнено обмежувальний резистор з опором $R = 0,20$ Ом. Яку потужність споживає піч?

P-?

$$I = 200 \text{ А}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

$$R = 0,20 \text{ Ом}$$

У цій задачі мова йде про теплову дію струму.

У задачах на теплову дію струму основним є закон Джоуля-Ленца.

Під час застосування закону треба враховувати наступне:

1. Зручно використовувати формулу $Q = I^2 R t$ для послідовного з'єднання споживачів, а формулу $Q = \frac{U^2}{R} t$ – для паралельного їх з'єднання.

2. Указані формули можна застосовувати у тих випадках, коли ділянка кола не містить джерела струму. Якщо на ділянці є джерела струму, то в якості основної формули треба брати $Q = I^2 R t$.

3. Формули $A = I U t$ і $Q = I^2 R t$, які визначають роботу сил електричного поля і кількість теплоти, що виділяється на ділянці кола, можна застосовувати незалежно від того, чи є на цій ділянці кола джерело струму, чи ні. Якщо на ділянці немає джерела струму, ці формули тотожні, робота сил поля в цьому випадку повністю йде на збільшення внутрішньої енергії провідника. Якщо ділянка містить джерело струму, то величини A і Q , розраховані за цими формулами, будуть різними. Яка величина буде більшою – A чи Q , залежить від напрямів струму і знаків ЕРС на ділянці.

У даній задачі: загальна потужність, що споживається $P = I U$; потужність, яка виділяється на зовнішньому опорі $P_1 = I^2 R$. Отже потужність, яка споживається, дорівнює $P_{\text{сп}} = P - P_1 = I U - I^2 R = 36 \text{ кВт}$.

Задача. Спіраль електроплитки з опором $R = 400 \text{ Ом}$ при включенні у мережу має температуру на $\Delta t_1 = 400^\circ \text{C}$ більшу, ніж температура повітря. Подальше нагрівання припиняється через тепловіддачі в оточуюче середовище. Якою буде різниця температур спіралі плитки й оточуючого повітря, якщо послідовно з плиткою увімкнути опір $R_1 = 100 \text{ Ом}$? Тепловіддача пропорційна різниці температур спіралі й оточуючого повітря.

$$\begin{array}{l} \Delta t_2 - ? \\ R = 400 \text{ Ом} \\ \Delta t_1 = 400^\circ \text{C} \\ R_1 = 100 \text{ Ом} \\ Q = k \Delta t \end{array}$$

Позначивши через Q_1 і Q_2 відповідно теплові потужності, що виділяються в електричній плитці в обох випадках, можна, згідно умови задачі, записати: $Q_1 = k \Delta t_1$, $Q_2 = k \Delta t_2$.

$$\text{Водночас } Q_1 = \frac{U^2}{R} \text{ і } Q_2 = \left(\frac{U}{R+R_1} \right)^2 R.$$

$$\text{Отримуємо } \frac{(R+R_1)^2}{R^2} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}.$$

$$\text{Звідси } \Delta t_2 = \Delta t_1 \left(\frac{R}{R+R_1} \right)^2, \Delta t_2 = 256^\circ \text{C}.$$

Задача. Електродвигун підйомного крана працює під напругою $U = 380 \text{ В}$, при цьому сила струму в його обмотці $I = 20 \text{ А}$. Який ККД установки, якщо вантаж масою $m = 1 \text{ т}$ кран піднімає на висоту $h = 19 \text{ м}$ за $\tau = 50 \text{ с}$?

$$\begin{array}{l} \eta - ? \\ U = 380 \text{ В} \\ I = 20 \text{ А} \\ m = 10^3 \text{ кг} \\ h = 19 \text{ м} \\ \tau = 50 \text{ с} \end{array}$$

У даній групі задач розглядається перетворення електричної енергії на механічну або внутрішню. Розв'язування таких задач ґрунтується на законі перетворення і збереження енергії.

Згідно умови задачі потужність, що споживається краном $P = I U$, а корисна потужність $P_{\text{к}} = \frac{mgh}{\tau}$.

$$\text{Звідси } \eta = \frac{P_{\text{к}}}{P} = \frac{mgh}{\tau I U}; \eta = 0,5 \text{ (50\%)}$$

Задача. Електродвигун увімкнений в мережу з напругою $U = 24 \text{ В}$. Чому дорівнює потужність на валу двигуна при протіканні по його обмотці струму

$I = 8\text{А}$, якщо відомо, що при повному гальмуванні якоря, по колу йде струм $I_2 = 16\text{А}$?

$$\frac{P_{\text{мех}}}{U} = ?$$

$$U = 24\text{В}$$

$$I = 8\text{А}$$

$$I_2 = 16\text{А}$$

Уся потужність струму, який іде по обмотці працюючого двигуна, дорівнюватиме сумі частин всієї потужності, яка перетворюється на механічну роботу, і частини потужності, що перетворюється на теплоту: $P = P_{\text{мех}} + P_{\text{теп}}$, але $P = IU$, а $P_{\text{теп}} = I^2 R$.

$$\text{Звідси } P_{\text{мех}} = P - P_{\text{теп}} = IU - I^2 R = I(U - IR).$$

Для визначення $P_{\text{мех}}$ треба знайти опір кола електродвигуна. Це можна зробити виходячи з умови, що при повному гальмуванні ротора напруга, прикладена до двигуна, дорівнює добутку сили струму на опір (у даному випадку не виникає протидія ЕРС індукції): $U = I_0 R$, звідси $R = \frac{U}{I_0}$.

$$P_{\text{мех}} = I \left(U - I \frac{U}{I_0} \right) = IU \left(1 - \frac{I}{I_0} \right), P_{\text{мех}} \approx 96\text{Вт}.$$

3. Самостійно розв'язати задачі:

1. Є дві лампочки, розраховані на напругу U_0 , потужністю $P_{10} = 100\text{Вт}$ і $P_{20} = 200\text{Вт}$ і опором $R_1 = 4840\text{Ом}$, $R_2 = 2420\text{Ом}$. Визначити потужність P_1 і P_2 , які виділяються у кожній лампочці, якщо їх паралельно приєднати до динамомашини з ЕРС $\xi = U_0$, внутрішнім опором $r = 10\text{Ом}$.

$$\text{(Відповідь: } P_1 = P_{10} \left[1 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) r \right]^{-1} = 99,3\text{Вт};$$

$$P_2 = P_{20} \left[1 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) r \right]^{-1} = 198,6\text{Вт}).$$

2. Нагрівач виготовлено з ніхромової дротини завдовжки $l = 8\text{м}$ і діаметром $d = 0,25\text{мм}$. Визначити потужність нагрівача під час вмикання його в коло постійного струму з напругою $U = 220\text{В}$.

$$\text{(Відповідь: } P = \frac{\pi U^2 d^2}{4 \rho l} \approx 270\text{Вт}).$$

3. Електродвигун трамвая працює при силі струму $I = 100\text{А}$ і напрузі $U = 500\text{В}$. У разі сили тяги двигуна $F = 4000\text{Н}$ трамвай має швидкість $v = 18 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Чому дорівнює опір обмотки двигуна?

$$\text{(Відповідь: } R = \frac{UI - Fv}{I} = 30\text{Ом}).$$

План заняття

I. Перевірка знання студентами понять: закон Джоуля-Ленца, робота і потужність електричного струму.

II. Колективний аналіз логіки розв'язування однієї з домашніх задач.

III. Розв'язування задач:

1. Лінія електропередачі повинна передати потужність $P = 100\text{кВт}$ на відстань $L = 100\text{км}$. Втрати енергії не повинні перебільшувати 2%. Який мінімальний переріз проводу (з питомим опором $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}\text{Ом} \cdot \text{м}$) придатного для цієї мети, якщо напруга, що передається $U = 5000\text{В}$? У скільки разів можна зменшити переріз проводу при збільшенні напруги у 10 разів?

$$\text{(Відповідь: } S = \frac{100 \rho L P}{U^2} = 7 \cdot 10^{-4}\text{м}^2; \text{ у 100 разів}).$$

2. Якої довжини l треба взяти провідник, який має переріз $S = 0,1\text{мм}^2$, щоб виготовити нагрівач, на якому можна за час $\tau = 5\text{хв}$ довести до кипіння $V = 1,5\text{л}$ води, взятої при температурі $t_1 = 20^\circ\text{C}$? Напруга в мережі $U = 220\text{В}$. ККД кип'ятильника $\eta = 90\%$. Питомий опір ніхрому $\rho = 7,1\text{мкОм}\cdot\text{м}$
(Відповідь: 2,4м).

3. Дві електричні лампочки, які розраховані на включення у мережу з напругою $U = 220\text{В}$, мають потужності $P_1 = 25\text{Вт}$ і $P_2 = 100\text{Вт}$. Яка з лампочок буде світитися яскравіше, якщо їх увімкнути у мережу, з'єднавши між собою послідовно? Знайти відношення яскравості лампочок при звичайному (поодинокому) і послідовному вмиканні. Вважати, що яскравості пропорційні тепловій потужності, яка виділяється у лампочці.

(Відповідь: $\frac{P'_1}{P'_2} = \frac{P_2}{P_1} = 4$; $\frac{P_1}{P'_1} = \left[1 + \frac{P_1}{P_2}\right]^2 = \frac{25}{16}$; $\frac{P_2}{P'_2} = \left[1 + \frac{P_2}{P_1}\right]^2 = 25$.)

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8

Розв'язування задач на застосування сил Ампера і Лоренца

Підготовка до заняття

1. Пригадати зміст понять: магнітне поле струму, магнітна індукція, сила Ампера, магнітний потік, сила Лоренца. [, с. 77 - 79].

2. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач.

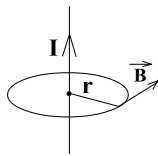
Задача. Сила струму в прямолінійному провіднику, прокладеному по стелі кімнати, частина якого проходить по стіні, дорівнює $I = 10\text{А}$. Визначити модуль вектора магнітної індукції в точці О, віддаленої на $l_1 = 0,2\text{м}$ від проводу на стелі і на $l_2 = 0,1\text{м}$ від проводу на стіні. Як напрямлений вектор \vec{B} ?

$$\vec{B}=?$$

$$I = 10 \text{ А}$$

$$l_1 = 0,2 \text{ м}$$

$$l_2 = 0,1 \text{ м}$$



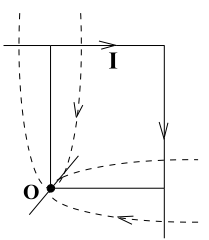
Вектор магнітної індукції \vec{B} в будь-якій точці поля спрямований вздовж дотичної до силової лінії поля.

Силкові лінії прямого струму – струму, що йде по прямолінійному провіднику, являють собою концентричні кола, центри яких лежать на провіднику. У даному

випадку вектор \vec{B} розміщений перпендикулярно до радіуса кола, проведеного до точки, в якій визначається \vec{B} . Модуль вектора магнітної індукції у даному випадку виражається формулою $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, де I – сила струму в прямолінійному провіднику, r – радіус відповідної силової лінії.

Якщо у даній точці простору одночасно існує декілька магнітних полів, то індукція магнітного поля дорівнює геометричній сумі індукцій $\vec{B}_1, \vec{B}_2 \dots$, створених у цій точці струмами $I_1, I_2 \dots$.

Напрямок силової лінії прямого струму, отже і напрям \vec{B} , визначається за правилом свердлика.



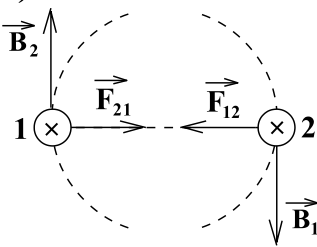
У точці O треба розглядати векторну суму магнітних індукцій створених струмами, що йдуть по провідникам, розміщеним на стелі і стіні. Якщо мислено провести силкові лінії через точку O і скористатися правилом свердлика, то вектори \vec{B}_1 і \vec{B}_2 будуть напрямлені в цій точці перпендикулярно до площини малюнка у протилежних напрямках.

$$\text{Отже, } B = B_1 - B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi l_1} - \frac{\mu_0 I}{2\pi l_2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{l_2 - l_1}{l_1 l_2}.$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{А}\cdot\text{м}}, \quad B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2\pi} \cdot \frac{0,1}{0,2} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}.$$

Задача. Довести як взаємодіють паралельні прямі струми а) одного напрямку; б) протилежних напрямів.

а)



Припустимо, що струми йдуть "від нас".

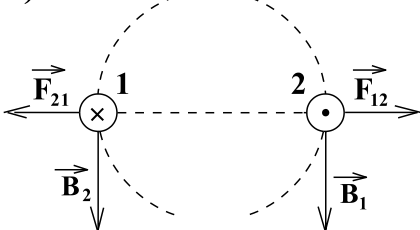
Провідники зображені у вигляді їх поперечних перерізів (провідники розміщені перпендикулярно до площини малюнка). Знаком "x" показано, що струм йде від нас. Пунктирними лініями зображено частини силових ліній.

Провідник зі струмом 1 створює магнітне поле, індукція якого \vec{B}_1 . Провідник зі струмом 2 створює магнітне поле, індукція якого \vec{B}_2 . Магнітні індукції визначені в точках, де розміщені відповідні провідники зі струмом.

Застосовуючи правило лівої руки визначаються напрями сил, з якими взаємодіють струми: \vec{F}_{12} – сила, що діє на провідник зі струмом 2 з боку магнітного поля, створеного провідником зі струмом 1.

Отже, провідники у випадку струмів однакового напрямку притягуються.

б)



Аналогічні дії приводять до висновку, що провідники зі струмами протилежних напрямів відштовхуються.

Якщо по двом паралельним провідникам не-

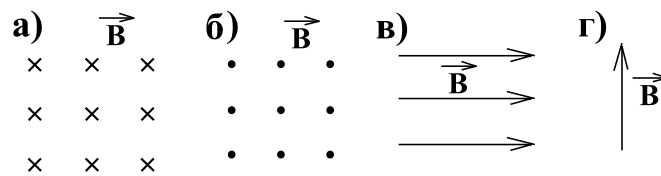
скінченної довжини проходять струми відповідно I_1 і I_2 , а відстань між провідниками d , то на кожний елемент цих провідників довжиною l діє сила, модуль якої дорівнює: $F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{2\pi d}$, де μ – магнітна проникність речовини середовища, в якому містяться провідники.

Задача. Горизонтальні рейки знаходяться на відстані $l = 0,3\text{м}$ одна від одної. На них лежить стержень, перпендикулярно рейкам. Якою повинна бути індукція магнітного поля, для того щоб стержень почав рухатися, якщо по ньому пропускати струм $I_0 = 50\text{А}$? Коефіцієнт тертя стержня об рейки $\mu = 0,2$. Маса стержня $m = 0,5\text{кг}$.

У даній і інших задачах про сили, що діють на провідник зі струмом в однорідному магнітному полі, зручно виконувати такі дії:

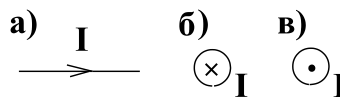
1. Зробити схематичний малюнок, на якому вказати контур зі струмом і напрям ліній магнітної індукції. Відмітити кути між напрямом \vec{B} і окремими елементами контуру, якщо останній складається з кількох прямих провідників.
2. Використовуючи правило лівої руки, визначити напрям сил, що діють з боку поля на кожний елемент контуру.
3. Записати рівняння $F = IB \sin \alpha$ і визначити шукану величину.
4. У багатьох задачах розглядаються відомі задачі з механіки, в яких додатково використовується сила Ампера.

Виконуючи схематичний малюнок для зручності можна по-різному зображувати магнітні поля:



а) магнітні силові лінії перпендикулярні площині малюнка і напрямлені "від нас"; б) те саме, але лінії магнітної індукції (силові лінії) напрямлені "до нас"; в) силові лінії лежать у площині малюнка; г) силові лінії не зображуються, а тільки вказується напрям вектора магнітної індукції.

Аналогічно зображуються провідники і напрями струмів в них:



Повернемося до розглядуваної задачі.

Можна зробити два малюнки

$B = ?$
 $l = 0,3\text{м}$
 $I_0 = 50\text{А}$
 $\mu = 0,2$
 $m = 0,5\text{кг}$

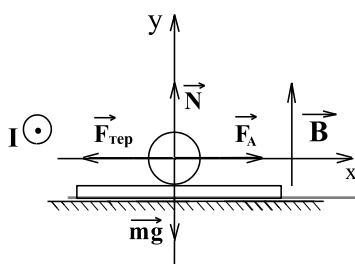


Зручніше скористатися другим малюнком:

Зображуються сили, що діють на провідник – сили тяжіння, нормального тиску, тертя і Ампера.

Знаючи напрям сили Ампера, зображується напрям вектора магнітної індукції.

Розв'язується задача на рівномірний рух тіла, враховуючи силу Ампера $F_A = IB l \sin \alpha = 1$.



$$\vec{F}_{\text{тер}} + \vec{N} + \vec{F}_A + \vec{m}g = 0$$

$$\begin{cases} OX: F_A - F_{\text{тер}} = 0 \\ OY: N - mg = 0 \\ F_{\text{тер}} = \mu N \end{cases}$$

$$F_A - \mu mg = 0, IBl = \mu mg, B = \frac{\mu mg}{Il}, B = 6,6 \cdot 10^{-2} \text{Тл.}$$

Задача. З дротини завтовшки $l = 20\text{см}$ виготовили квадратний контур. Знайти момент сил, який діє на контур, вміщений в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 0,1\text{Тл}$. У контурі йде струм силою $I = 2\text{А}$. Площа контуру перпендикулярна до ліній індукції магнітного поля.

$$\begin{array}{l} M-? \\ l = 20\text{см} \\ B = 0,1\text{Тл} \\ I = 2\text{А} \end{array} \left| \begin{array}{c} \times \times \times \times \times \\ \times \begin{array}{c} \times \times \times \\ \times \times \times \\ \times \times \times \\ \times \times \times \end{array} \times \\ \times \times \times \times \times \end{array} \right. \vec{B}$$

На виток зі струмом, який знаходиться в однорідному магнітному полі, діє обертальний момент пари сил поля, модуль якого дорівнює:

$$M = F_A \sin\alpha \text{ або } M = IB S \sin\varphi,$$

де $S = la$ – площа витка, φ – кут між вектором \vec{B} і

нормаллю до площини витка.

$$\text{Сторона квадрата } a = \frac{1}{4}l, \text{ а його площа } S = \frac{1}{16}l^2.$$

$$\text{Отже, } M = \frac{1}{16}l^2 IB, M = 5 \cdot 10^{-4} \text{Н} \cdot \text{м.}$$

Задача. Пройшовши прискорюючу різницю потенціалів $U = 3,52\text{кВ}$, електрон влітає в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 0,01\text{Тл}$ перпендикулярно лініям індукції і рухається по колу радіусом $R = 2\text{см}$. Обчислити відношення заряду електрона до його маси, період обертання електрона.

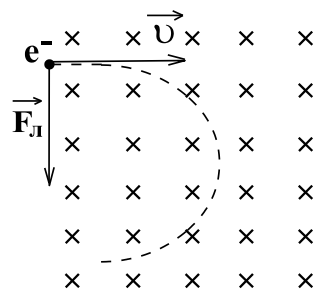
$$\begin{array}{l} e \\ m \\ U = 3,52\text{кВ} \\ B = 0,01\text{Тл} \\ R = 2\text{см} \end{array} \left| \begin{array}{l} -? T-? \\ \end{array} \right.$$

Дана задача відноситься до задач на рух заряджених частинок у магнітному й електричному полях.

Під час їх розв'язування доцільно: зробити малюнок, на якому вказати лінії магнітної індукції (і лінії напруженості електричного поля, за умови, що про нього йде мова в задачі); зобразити вектор початкової швидкості частинки і відмітити знак її заряду.

Якщо частинка влітає в магнітне поле, то вона рухається рівномірно по колу під дією сили Лоренца $F_L = qvB \sin\alpha$, яка відіграє роль сили, що створює доцентрове прискорення частинки.

Зображаючи сили, що діють на заряджену частинку, де немає спеціальних вказівок, силу тяжіння, що діє на частинку, не враховують.



У даній задачі робота електричного поля eU йде на збільшення кінетичної енергії частинки $\frac{mv^2}{2}$.

$$\text{Отже, } eU = \frac{mv^2}{2}, v^2 = \frac{2eU}{m}.$$

Сила Лоренца створює доцентрове прискорення

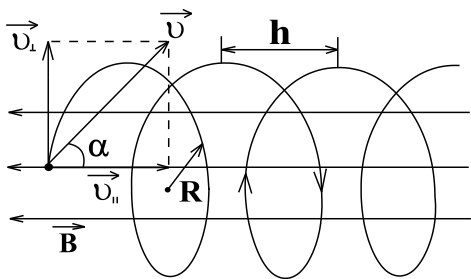
$$evB = \frac{mv^2}{R}.$$

$$\text{Звідси } \frac{e}{m} = \frac{Bv}{R}, \frac{e}{m} = \frac{B}{R} \sqrt{\frac{2eU}{m}}, \frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 R^2}, \frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Період обертання можна визначити враховуючи, що електрон рухається

рівномірно по колу радіуса R : $v = \frac{2\pi R}{T}$, $\frac{2\pi R}{T} = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$, $T = 2\pi R \sqrt{\frac{m}{2eU}}$.

Задача. Протон, маючи швидкість v , попадає в однорідне магнітне поле, індукція якого B складає кут α з v . Коло якого радіусу буде описувати протон? Чому дорівнює робота сили, що діє на протон? Якою траєкторією рухатиметься протон?



Розкладемо швидкість протона на швидкість у напрямі \vec{B} і напрямі, йому перпендикулярному:

$$v_{\perp} = v \sin \alpha$$

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha.$$

Як і в попередній задачі протон повинен рухатися по колу, маючи швидкість v_{\perp} . Водночас протон рухається прямолінійно рівномірно вздовж ліній індукції.

Таким чином, якщо заряджена частинка влітає в однорідне магнітне поле так, що її вектор швидкості напрямлений під кутом α до вектора \vec{B} і дія всіх сил, окрім сили Лоренца, дуже мала, то частинка починає рухатися за гвинтовою лінією.

$$qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{R}, \quad R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}.$$

$$\text{Крок гвинтової лінії } h = v_{\parallel}T = v \cos \alpha T.$$

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}; \quad h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB}.$$

Виконана робота дорівнює нулю, тому що сила весь час перпендикулярна переміщенню протона.

3. Самостійно розв'язати задачі:

1. В однорідному магнітному полі рухається з прискоренням $a = 2 \frac{m}{c^2}$ прямолінійний провід, площа поперечного перерізу якого $S = 1 \text{ мм}^2$. Напрямок проводу перпендикулярний до ліній індукції і в проводі йде струм $I = 1 \text{ А}$. Густина матеріалу проводу $\rho = 2,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Визначити індукцію магнітного поля.

$$(\text{Відповідь: } B = \frac{\rho S a}{I}).$$

2. Частинка, маса якої $m = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ кг}$, влітає зі швидкістю $v = 5 \cdot 10^3 \frac{m}{c}$ в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ перпендикулярно лініям магнітної індукції. Знайти зміну імпульсу частинки за час $t = 0,125 \text{ с}$ і період її обертання. Заряд частинки $q = 10^{-12} \text{ Кл}$.

$$(\text{Відповідь: } T = \frac{2\pi R}{v} = 0,1 \text{ с}; \quad \Delta p = \sqrt{2} m v).$$

3. Кільцева петля радіусом $R = 10 \text{ см}$ розміщена так, що її площина перпендикулярна до індукції поля. Чому дорівнює магнітний потік крізь петлю, якщо $B = 0,2 \text{ Тл}$? Чому дорівнює магнітний потік крізь петлю, якщо її площина буде паралельною магнітній індукції поля?

$$(\text{Відповідь: } \Phi = \pi B R^2 = 6,28 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}, \quad \Phi = 0).$$

План заняття

I. Перевірка знання студентами понять: магнітне поле струму, магнітна індукція, сила Ампера, магнітний потік, сила Лоренца.

II. Колективний аналіз логіки розв'язування однієї з домашніх задач.

III. Розв'язування задач:

1. Прямий провід, маса якого $m = 50\text{г}$ і довжина $l = 20\text{см}$, висить горизонтально за допомогою двох ниток, прив'язаних до його кінців. Провід міститься в однорідному вертикальному магнітному полі індукцією $B = 0,75\text{Тл}$. Якої сили струм треба пропустити крізь провід, щоб він відхилився від положення рівноваги і нитки утворили з вертикаллю кут $\alpha = 30^\circ$ кожна?

(Відповідь: $I = \frac{mg}{Bl} \operatorname{tg} \alpha$, $I \approx 2\text{А}$).

2. В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,06\text{Тл}$ міститься прямокутна рамка, яка має $n = 200$, ширину $d = 5\text{см}$ і довжину $l = 8\text{см}$. Спочатку рамка була перпендикулярною до ліній індукції магнітного поля. Як зміниться магнітний потік, якщо повернути рамку з цього положення на цілий оберт навколо осі, перпендикулярної до ліній індукції?

(Відповідь: $\Phi = Bdl \cos \alpha$, $\Delta \Phi = 0$).

3. Протон і α -частинка влітають в однорідне магнітне поле перпендикулярно лініям індукції. Порівняти радіуси кіл, які описують частинки, якщо у них однакові: а) швидкості, б) енергії.

(Відповідь: а) $\frac{R_1}{R_2} = 2$, б) $\frac{R_1}{R_2} = 1$).

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 9

Розв'язування задач на застосування законів електромагнітної індукції

Підготовка до заняття

1. Пригадати зміст понять: явище електромагнітної індукції, індукційне електричне поле, закон електромагнітної індукції, рух провідника у незмінному магнітному полі, самоіндукція, індуктивність, енергія магнітного поля. [, с. 87 - 89].

2. Ознайомитися з методами розв'язування окремих типів задач.

Задача. В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,1\text{Тл}$ розміщено

плоский дротяний виток, площа якого $S = 10^3 \text{ см}^2$, а опір $R = 20 \text{ Ом}$ таким чином, що його площина перпендикулярна силовим лініям. Виток замкнуто на гальванометр. Повний заряд, який пройшов через гальванометр при повороті витка, $q = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$. На який кут повернули виток?

$$\begin{array}{l} \Delta\alpha - ? \\ B = 0,1 \text{ Тл} \\ S = 10^3 \text{ см}^2 \\ R = 20 \text{ Ом} \\ q = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл} \\ \alpha_1 = 90^\circ \end{array}$$

Заряд, що проходить через гальванометр, є результатом виникнення у витку індукційного струму. Отже, в задачі розглядається явище електромагнітної індукції, під час розв'язування якої використовується закон цього явища: $\xi_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ або $\xi_i = -n \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, де n – кількість витків у котушці (рамці), розміщеної у магнітному полі.

Застосування закону електромагнітної індукції, у загальному випадку, передбачає такі дії:

1. З'ясування причин зміни магнітного потоку, пов'язаного з контуром і визначення, яка з величин B , S або α , що входять у вираз для Φ , змінюється протягом часу.

2. Запис виразу для Φ у розгорнутому вигляді. Для цього вибирають два моменти часу t_1 і t_2 , для кожного з них визначають потоки Φ_1 і Φ_2 , пов'язані з даним контуром.

В залежності від умови задачі, використовується одна з таких формул:

$$\Delta\Phi = (B_2 - B_1)S \cdot \cos\alpha;$$

$$\Delta\Phi = BS(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1);$$

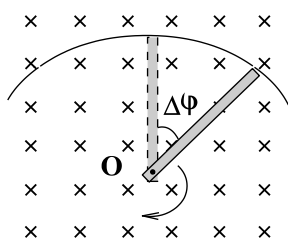
$$\Delta\Phi = B\Delta S \cdot \cos\alpha.$$

3. Запис закону електромагнітної індукції із врахуванням виразу для $\Delta\Phi$ і додаткових умов.

У розглядуваній задачі виходимо з того, що $q = I\Delta t$, $I = \frac{\xi}{R}$, $\xi = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Тому $q = \frac{\Delta\Phi}{R}$. Змінюється кут між вектором B і нормаллю до площини витка. Отже, $\Delta\Phi = BS(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)$.

$$q = \frac{BS(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)}{R}, \quad \cos\alpha_2 = \frac{qR}{BS}, \quad \Delta\alpha = 120^\circ.$$

Задача.
обертається
вою швидкі-
виникає у
рез кінець
ного поля.



У магнітному полі з індукцією $B = 10^{-2} \text{ Тл}$ стержень довжиною $l = 0,2 \text{ м}$ зі сталюю кутостою $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$. Знайти ЕРС індукції, що стержні, якщо вісь обертання проходить через стержня паралельно лініям індукції магнітного поля.

$$\begin{array}{l} \xi - ? \\ B = 10^{-2} \text{ Тл} \\ l = 0,2 \text{ м} \\ \omega = 100 \text{ с}^{-1} \end{array}$$

Під час переміщення стержня у магнітному полі разом з ним переміщуються вільні електрони, що є у провіднику. Тому на вільні електрони діє сила Лоренца, яка викликає зміщення вільних електронів уздовж стержня і створює між його кінцями різницю потенціалів рівну ЕРС індукції. Знаки потенціалів, тобто тих зарядів, якого знаку більше на даному кінці стержня, визначається правилом лівої руки.

У даній і аналогічних задачах треба скористатися таким розв'язком:

ЕРС індукції $\xi = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, $\Delta\Phi$ – магнітний потік, який проходить через поверхню, що описує стержень за час Δt .

Стержень обертається під прямим кутом до ліній індукції, тому $\Delta\Phi = B\Delta S$.

Площа сектора ΔS , яку описує стержень, дорівнює $\Delta S = \frac{\Delta\varphi t^2}{2} = \frac{\omega\Delta t t^2}{2}$, де $\Delta\varphi$ – кут, на який повернеться стержень за час Δt і $\Delta\varphi = \omega\Delta t$.

Отже, $\Delta\Phi = \frac{B\omega t^2}{2}\Delta t$, $\xi = \frac{B\omega^2 t^2}{2}$, $\xi = 2 \cdot 10^{-2} \text{ В}$.

Задача. Реактивний літак, який має розмах крил $l = 50 \text{ м}$, летить горизонтально зі швидкістю $v = 800 \frac{\text{км}}{\text{год}}$. Визначити різницю потенціалів, що виникає між кінцями крил, якщо вертикальна складова індукції магнітного поля Землі $B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.

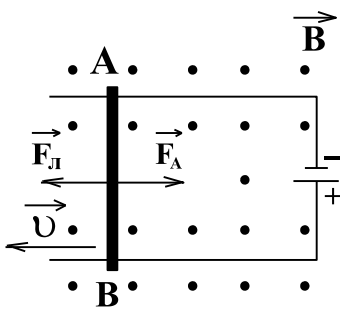
$\Delta\varphi - ?$
$l = 50 \text{ м}$
$v = 800 \frac{\text{км}}{\text{год}}$
$B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$

Механізм виникнення різниці потенціалів між кінцями крил такий самий, як і в попередній задачі.

Особливістю цієї групи задач є розгляд поступального руху прямого провідника у магнітному полі. Для такого випадку треба скористатися такою формулою для ЕРС індукції: $\xi_i = lvB\cos\alpha$. Напрямок індукційного струму в даному випадку (отже, і полярності ξ_i) визначають за правилом правої руки.

$\Delta\varphi = \xi = lvB$, $\Delta\varphi = 0,55 \text{ В}$.

Задача. Дві паралельні шини, які підключені до акумулятора з ЕРС ξ_0 і внутрішнім опором r , містяться в однорідному магнітному полі з індукцією \vec{B} . Шини замкнені провідником довжиною l і опором R , який переміщується по шинах без порушення контакту перпендикулярно лініям індукції поля зі швидкістю \vec{v} . Нехтуючи опором шин, визначити напругу на затискачах джерела, потужність, що виділяється у провіднику, а також механічну потужність, яка підводиться до провідника.



Особливістю даної групи задач є наявність в колі акумулятора і одночасне виникнення на одній із ділянок кола ЕРС індукції. Ця ЕРС виникає внаслідок руху провідника в магнітному полі.

Розв'язування таких задач доцільно розпочинати з визначення полярності і модуля ЕРС індукції. Після цього задача зводиться до розрахунку звичайного кола постійного струму з кількома джерелами ЕРС, з'єднаними між собою послідовно або паралельно.

Згідно правила правої руки індукційний струм йде від В до А, зменшуючи струм акумулятора, тобто ЕРС ξ_0 і ξ_i мають протилежні знаки.

Провідник рухається перпендикулярно силовим лініям магнітного поля, тому $\xi_i = lvB$.

Припустимо $\xi_0 > \xi_i$, тоді загальна ЕРС контура $\xi = \xi_0 - \xi_i$, а сила струму в контурі $I = \frac{\xi_0 - \xi_i}{R+r}$.

Напруга на затискачах джерела $U = \xi_0 - Ir$, адже акумулятор розряджається і струм через нього йде у природному напрямі $U = \frac{\xi_0 R - lvBr}{R+r}$.

Потужність, що виділяється у провіднику: $P = I^2 R$, $P = \frac{(\xi_0 - lvB)^2 R}{(R+r)^2}$.

Механічна потужність $N = F_T \cdot v$.

Сила тяги дорівнює силі Ампера, яка згідно правила лівої руки напрямлена до джерела $F_A = IBl$.

Отже, $N = \frac{(\xi_0 - lvB)lvB}{R+r}$.

Задача. Індуктивність обмотки якоря електродвигуна тролейбуса $L = 0,5 \text{ Гн}$. Визначити ЕРС самоіндукції під час розмикання кола, якщо за час $t = 0,05 \text{ с}$ сила струму зменшилася від 20 А до нуля.

ЕРС самоіндукції визначається за формулою:

$\xi - ?$ $L = 0,5 \text{ Гн}$ $t = 0,05 \text{ с}$ $I_1 = 20 \text{ А}$ $I_2 = 0$	$\xi_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ $\Delta I = I_2 - I_1, \quad \xi_c = L \frac{I_1}{\Delta t}$ $\xi_c = 0,5 \frac{20}{0,05} = 200 \text{ В}$
--	---

Задача. За рівномірної зміни сили струму в котушці в ній виникає ЕРС самоіндукції $\xi_c = 5 \text{ В}$. Котушка має $n = 500$ витків. Яка потужність виділятиметься при цьому в замкненому дротяному витку, надітому на котушку? Опір витка $R = 0,20 \text{ Ом}$.

$P - ?$ $\xi_c = 5 \text{ В}$ $n = 500$ $R = 0,20 \text{ Ом}$	<p>У даній задачі розглядаються одночасно два явища: виникнення ЕРС самоіндукції внаслідок зміни сили струму в котушці $\xi_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$; виникнення ЕРС індукції у витку, навколо якого змінюється магнітне поле, створене струмом у котушці $\xi_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$.</p>
--	--

ЕРС самоіндукції можна визначити і за загальною формулою $\xi_c = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} n$.

Один і той самий магнітний потік пронизує котушку і виток.

Отже, $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\xi_c}{n}$ і $\xi_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$. Тому $\xi_i = \frac{\xi_c}{n}$.

Потужність, що виділяється у витку $P = \frac{\xi_i^2}{R} = \frac{\xi_c^2}{n^2 R}$.

Задача. У котушці електромагніту з індуктивністю $L = 0,4 \text{ Гн}$ проходить струм силою $I = 10 \text{ А}$. Визначити енергію магнітного поля електромагніту.

$W - ?$ $L = 0,4 \text{ Гн}$ $I = 10 \text{ А}$	
---	--

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

$$W = 20 \text{ Дж}$$

3. Самостійно розв'язати задачі:

1. Плоский виток, площа якого дорівнює 100см^2 розміщений перпендикулярно до ліній індукції однорідного магнітного поля. Яка ЕРС виникає у витку, якщо індукція поля рівномірно зменшується від $0,7$ до $0,2\text{Тл}$ за 10^{-4}с ?

(Відповідь: 5В).

2. Стержень завдовжки $l = 1\text{м}$ обертається з кутовою швидкістю $\omega = 20\text{с}^{-1}$ в магнітному полі з індукцією $B = 10^{-2}\text{Тл}$. Вісь обертання проходить через кінець стержня перпендикулярно до нього і паралельно лініям індукції. Знайти ЕРС індукції, яка виникає у стержні.

(Відповідь: $\xi = \frac{B\omega l^2}{2}$, $\xi = 0,1\text{В}$).

3. З якою швидкістю має рухатися провідник, перпендикулярно до ліній індукції однорідного магнітного поля, щоб між кінцями провідника виникла різниця потенціалів $U = 0,01\text{В}$? Індукція магнітного поля $B = 0,2\text{Тл}$, довжина провідника $l = 10\text{см}$

(Відповідь: $v = 0,5\frac{\text{м}}{\text{с}}$).

План заняття

I. Перевірка знання студентами понять: явище електромагнітної індукції, індукційне електричне поле, закон електромагнітної індукції, рух провідника у незмінному магнітному полі, самоіндукція, індуктивність, енергія магнітного поля.

II. Колективний аналіз логіки розв'язування однієї з домашніх задач.

III. Розв'язування задач:

1. Одношарова котушка діаметром $D = 5\text{см}$ розміщена в однорідному магнітному полі паралельно її осі. Індукція поля рівномірно змінюється зі швидкістю $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 10^{-2}\frac{\text{Тл}}{\text{с}}$. Котушка містить $N = 1000$ витків мідного дроту ($\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}\text{Ом} \cdot \text{м}$) перерізом $S = 0,2\text{мм}^2$. 1). До кінців котушки підключено конденсатор ємністю 10мкФ . Визначити заряд в ньому. 2). Кінці котушки замкнені накоротко. Визначити теплову потужність, що виділяється у котушці.

(Відповідь: $q = C \frac{\Delta B}{\Delta t} \cdot \frac{\pi D^2}{4} N$; $P = \left(\frac{\Delta B}{\Delta t}\right)^2 \cdot \frac{\pi D^2 N S}{16\rho}$).

2. В однорідне магнітне поле з індукцією B поміщено металеве кільце радіусом l , причому його вісь збігається з напрямом поля. Від центра до кільця відходять два стержні, які мають контакт між собою і з кільцем. Один стержень нерухомий, а другий рівномірно рухається з кутовою швидкістю ω . Знайти струм, який іде через стержні, якщо опір кожного з них R (опором кільця знехтувати).

(Відповідь: $I = \frac{B\omega l^2}{4R}$).

3. Металевий диск радіусом $l = 10\text{см}$ розміщено перпендикулярно магнітному полю з індукцією $B = 1\text{Тл}$, обертається навколо осі, яка проходить через центр, роблячи $n = 100$ обертів за секунду. Два ковзаючих контакти (один на осі диску, другий – на колі) з'єднують диск з реостатом опором $R = 50\text{Ом}$. Чому дорівнює теплова потужність, що виділяється на реостаті?

(Відповідь: $P = \frac{B^2 4\pi^2 n^2 l^2}{4R}$, $P \approx 1,96\text{Вт}$).

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 10
Контрольне заняття

Використана література.

1. Балаш В.А. Задачи по физике и методы их решения: Пособие для учителя. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Просвещение, 1983. – 432с.
2. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики. Навч.

посібник.: У 2-х кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – 2-ге вид. – К.: Либідь, 2001. – 448с.

3. Головка Д.Б. Загальні основи фізики: Електродинаміка: Навч. посібник. / Г.Б.Головка, А.А.Моляренко, Ю.А.Ментковська. – К.: Либідь, 1994. – 128с.

4. Гольдфарб Н.К. Сборник вопросов и задач по физике. Учеб. пособие для поступающих во втузы, 4-е изд. – М.: Высшая школа, 1975. – 368с.

5. Гончаренко С.У. Збірник задач і запитань з фізики: Навч. посібник для 9-11 кл. загальноосвіт. навч. закладів. – К.: Освіта, 2004. – 383с.

6. Гончаренко С.У. Фізика: Пробн. навч. посібник для ліцеїв та класів природничо-наукового профілю. 10 клас. – К.: Освіта, 1995. – 384с.

7. Елизаров К.Н. Основы учения об электрическом поле (электростатика). / Пособие для учителей. – М.: Гос. уч.-пед. изд. МП РСФСР, 1980. – 173с.

8. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высшая школа., 1991. – 285с.

9. Калашников С.Г. Электричество. Учебное пособие. – 5-е изд. испр. и доп. – М.: Наука. Глав. изд.-во физ.-мат. литературы, 1985. – (Общий курс физики) – 376с.

10. Каленик В.І., Каленик М.В. Шкільний курс фізики /Методичний посібник. – Суми: СумДПУ ім. А.С.Макаренка, 2001. – 116с.

11. Каменецкий С.Е., Пустыльник И.Г. Электродинамика в курсе физики средней школы. /Пособие для учителей. – М.: Просвещение, 1978. – 127с.

12. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальна фізика: Електрика і магнетизм: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і допов. – К.: Вища школа, 1995. – 392с.

13. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1983. – 463с.

14. Методика преподавания физики в средней школе: Молекулярная физика. Электродинамика: Пособие для учителя. /Под ред. С.Я.Шамаша. – 2-е изд., перераб. – М.: Просвещение, 1987. – 256с.

15. Методика преподавания физики в средней школе: Частные вопросы: Учеб. пособие для студентов пед. ин.-тов по физ.-мат. спец. /Под ред. С.Е.Каменецкого, Л.А.Ивановой. – М.: Просвещение, 1987. – 336с.

16. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б. Физика: Учебник для 10 кл. сред. шк. – М.: Просвещение, 1987. – 336с.

17. Научные основы школьного курса физики /Под ред. С.Я.Шамаша, Э.Е.Эвенчик. – М.: Педагогика, 1985. – 240с.

18. Розенберг М.І. Методика навчання фізики в середній школі: Молекулярна фізика. Основи електродинаміки. /Посібник для вчителів. – К.: Рад. школа, 1973. – 238с.

19. Рымкевич А.П. Сборник задач по физике для 8-10 классов средней школы. – 12-е изд. – М.: Просвещение, 1988. – 191с.

20. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 3-е изд., испр. – М.: Наука. Глав. изд.-во физ.-мат. литературы., 1988. – 490с.

21. Телеснин Р.В., Яковлев В.Ф. Курс физики. Электричество. – 2-е изд.

перераб. Учебное пособие для физ.-мат. фак.-тов пед. ин.-тов. – М.: Просвещение, 1969. – 488с.

22. Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.Н. Электродинамика: Учебное пособие для студентов физ. спец. университетов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1990. – 350с.

23. Физический энциклопедический словарь /Гл. ред. А.М.Прохоров. Ред. кол. Д.М.Алексеев, А.М.Бонч-Бруевич и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – 944с.

24. Чолпан П.Ф. Фізика (з філософським аналізом). / За заг. ред. О.Е.Жмудського. – К.: Вища шкла, 1972. – 428с.

25. Шахмаев Н.М. и др. Физика: Учебник для 10кл. сред. шк. /Н.М.Шахмаев, С.Н.Шахмаев, Д.Ш.Шодиев. – М.: Просвещение, 1991. – 240с.

26. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Л.Б.Милковская Курс физики: Т.2. Электричество и магнетизм – Изд. третье, испр. – М.: Высшая школа, 1966. – 411с.

27. Яворский Б.М. Основные вопросы современного школьного курса физики: Пособие для учителей. – М.: Просвещение, 1980. – 320с.

Зміст

<i>Передмова</i>	3
ЛЕКЦІЇ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ ЕЛЕКТРОДИНАМІКА	

Електродинаміка в шкільному курсі фізики.....	10
Електромагнітне поле і речовина.....	11
Роль системи відліку в електродинаміці.....	12
ЕЛЕКТРОСТАТИКА	
Електричний заряд	
Заряд – властивість. Заряд макроскопічних тіл. Заряд – фізична величина. Термін "заряд" у науковій та методичній літературі. Дискретність, інваріантність, збереження заряду.....	14
Закон Кулона	
Експериментальне відкриття закону Кулона. Умови і межі його застосування.....	18
Електростатичне поле	
Далекодія і близькодія. Електричне поле. Напруженість – силова характеристика поля. Потенціал – енергетична характеристика поля.....	21
Провідники в електростатичному полі	
Розподіл електричних зарядів на провіднику. Електростатична індукція.....	26
Діелектрики в електростатичному полі	
Полярні і неполярні молекули. Поляризація діелектриків. Поле всередині діелектрика.....	27
Електроємність.....	
ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ	
Електричний струм.....	
Електрорушійна сила	
Сторонні сили. ЕРС.....	32
Електричне поле при наявності постійних струмів	
Механізм здійснення постійного струму. Стаціонарне електричне поле.....	33
Закон Ома	
Закон Ома для однорідної, неоднорідної ділянок і повного кола.....	34
Класична теорія електропровідності металів	
Основні положення теорії. Вивід законів Ома і Джоуля-Ленца.....	36
МАГНЕТИЗМ	
Магнітне поле	
Магнітне поле. Магнітна індукція і силові лінії магнітного поля. Постійні магніти і гіпотеза Ампера. Способи введення поняття "магнітна індукція" в шкільному курсі фізики.....	39
Магнітні властивості речовини	
Магнетики. Діамагнетики. Парамагнетики. Феромагнетики.....	42
Електромагнітна індукція	
Явище електромагнітної індукції.....	46
Індукційне електричне поле.....	
Явище самоіндукції. Індуктивність.....	
ДОДАТОК	
Базові структури циклів навчального процесу з введення окремих понять "Електродинаміки"	
Закон Кулона.....	51
Напруженість електричного поля.....	53

Потенціал. Різниця потенціалів.....	55
Електроємність. Конденсатор.....	57
Закон Ома для повного кола.....	59
Сила Лоренца.....	60

**ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ. РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ У
ЦИКЛАХ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ З ВИВЧЕННЯ ПОНЯТЬ
І ЗАКОНІВ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ**

<i>Електростатика. Постійний електричний струм.....</i>	62
Практичне заняття 1. Розв'язування задач із рівноваги заряджених тіл.....	65
Практичне заняття 2. Розв'язування задач із розрахунку руху, роботи, енергії в електростатичному полі.....	74
Практичне заняття 3. Розв'язування задач з визначення характеристик конденсаторів та їх систем.....	81
Практичне заняття 4. Розв'язування задач на застосування законів постійного струму.....	88
Практичне заняття 5. Контрольне заняття.....	93
<i>Постійний електричний струм. Магнітне поле. Електромагнітна індукція.....</i>	94
Практичне заняття 6. Розв'язування задач на застосування законів постійного струму (З'єднання джерел струму. Закон Ома для повного кола.).....	97
Практичне заняття 7. Розв'язування задач на застосування законів постійного струму (Робота і потужність постійного струму).....	103
Практичне заняття 8. Розв'язування задач на застосування сил Ампера і Лоренца.....	108
Практичне заняття 9. Розв'язування задач на застосування законів електромагнітної індукції	113
Практичне заняття 10. Контрольне заняття.....	117
<i>Використана література.....</i>	118

Для нотаток

Навчальне видання

КАЛЕНИК Віктор Іванович

Заслужений учитель України, Лауреат Всесоюзного конкурсу
„Учитель року – 90”, доцент, кандидат педагогічних наук

КАЛЕНИК Михайло Вікторович

доцент, кандидат педагогічних наук

**Лекційно-практичні заняття
з методики викладання окремих тем
шкільного курсу фізики**

Частина 3

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

Навчальний посібник
для студентів фізико-математичних факультетів
педагогічних університетів

Суми: СумДПУ, 2007р.

Свідоцтво ДК №231 від 02.11.2000р.

Відповідальний за випуск **В.В.Бугаєнко**
Комп'ютерний набір та верстка **М.В.Каленик**

Здано в набір Підписано до друку Формат 60x84/16.
Гарн. Times New Roman Сур. Папір друк. Друк ризогр. Умовн. друк. арк. .
Обл.-вид. арк. . Тираж 500. Вид. № 36.

СумДПУ ім. А.С.Макаренка
40002, Суми, Роменська, 87
Виготовлено на обладнанні СумДПУ ім. А.С.Макаренка
Зам. №