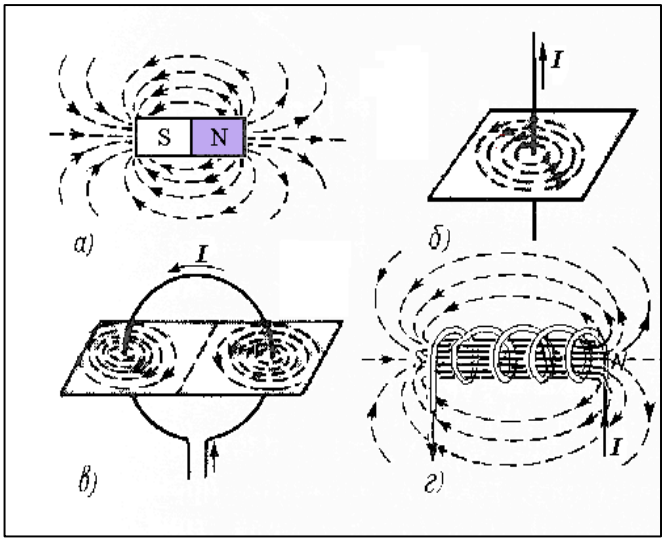
Т.Г. СІЧКАР, А.В. КАСПЕРСЬКИЙ

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ



КИЇВ – 2008

Т.Г. Січкар, А.В. Касперський

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

Рекомендовано Міністерством
освіти і науки України
як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів.

КИЇВ - 2008

УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73
С 41

Гриф надано Міністерством освіти і науки України лист №14/18-Г-1879 від05.11.07 р.

Автори : кандидат фізико-математичних наук, доцент Т. Г. Січкар,
доктор педагогічних наук, професор А.В.Касперський

Рецензенти : член-кореспондент АПН України, доктор педагогічних наук, професор М.Т.Мартинюк (Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини),
доктор педагогічних наук, професор Б.А.Сусь (Військовий інститут телекомунікацій і інформатизації НТУ "Київський політехнічний інститут").

СІЧКАР Т.Г., КАСПЕРСЬКИЙ А.В. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ.
С 41 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ. Навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей. Київ: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2007.- 164с.

Навчальний посібник призначений для самостійної роботи студентів в умовах модульно-рейтингової системи навчання та оцінювання знань студентів. До посібника включено робочу програму, дидактичну карту навчальної дисципліни, розроблені авторами, перелік основних понять та означень, загальні методичні поради при аналізі та розв'язуванні задач. Основну частину складає путівник по практичним заняттям, які розділені на три модулі: «Електростатика», «Постійний струм», «Електромагнетизм» і містять 105 прикладів розв'язків задач та 144 задач для самостійного розв'язку. Навчальний посібник складено на основі галузевого стандарту вищої освіти затвердженого МОН України та відповідно до діючої програми загального курсу фізики для фізичних спеціальностей вищих педагогічних навчальних закладів.

Для викладачів та студентів фізичних, інженерно-технічних і педагогічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73

Національний педагогічний університет імені М.П.Драгоманова, 2008

ISBN 978-966-660-466-1

© Січкар Т.Г., Касперський А.В.,2008

ЗМІСТ

Робоча програма з дисципліни ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ …… 5
Пояснювальна записка …… 5
Зміст навчальної дисципліни …… 6
Модульна структура розділу «Електрика і магнетизм» …… 11
Орієнтовний перелік тем практичних занять ……. 12
Орієнтовний перелік лабораторних робіт ……. 13
Загальні методичні рекомендації …… 14
Критерії оцінювання рівня знань і умінь …… 18
Дидактична карта навчальної дисципліни …… 21

Основні поняття, правила, означення …… 23
Загальні методичні поради при аналізі і розв'язуванні задач ….. 33

Модуль № 1 ЕЛЕКТРОСТАТИКА.
Поради до розв'язку задач з електростатики …… 35
Основні фізичні закономірності і формули, що використовуються при розв'язуванні задач з електростатики … 38
Практичне заняття № 1. Взаємодія точкових зарядів. Закон Кулона… 41
Практичне заняття № 2. Напруженість поля. Принцип суперпозиції… 46
Практичне заняття № 3. Напруженість поля. Теорема Гаусса. ……. 53
Практичне заняття № 4. Потенціал поля. …… 58
Практичне заняття № 5. Електроємність. Конденсатори. …… 62
Практичне заняття № 6. З'єднання конденсаторів. …… 65
Практичне заняття № 7. Електричне поле в діелектриках…… 69
Практичне заняття № 8. Енергія та густина енергії електричного поля. 73
Задачі для самостійного розв'язування з електростатики…… 78

Модуль № 2 ПОСТІЙНИЙ СТРУМ.
Поради до розв'язку задач на постійний струм …… 84
Основні фізичні закономірності і формули, що використовуються при розв'язуванні задач на постійний струм 86
Практичне заняття № 9. Постійний електричний струм. Закони Ома 89
Практичне заняття № 10. Опір провідників. З'єднання провідників. 93
Практичне заняття № 11. Робота і потужність постійного струму. Закон Джоуля-Ленца. …… 97
Практичне заняття № 12. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа. …… 102
Практичне заняття № 13. Електропровідність твердих тіл…… 107
Практичне заняття № 14. Контактні явища в металах та напівпровідниках. …… 109

Практичне заняття № 15. Електричний струм в електролітах, газах, вакуумі. …… 111
Задачі для самостійного розв'язування на постійний струм…… 114

Модуль № 3 ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.
Поради до розв'язку задач з електромагнетизму …… 122
Основні фізичні закономірності і формули, що використовуються при розв'язуванні задач з електромагнетизму …… 125
Практичне заняття № 16. Індукція і напруженість магнітного поля. 130
Практичне заняття № 17. Взаємодія струмів. Закон Ампера. Сила Лоренца. …… 135
Практичне заняття № 18. Магнітний потік. Робота по переміщенню провідника із струмом в магнітному полі… 140
Практичне заняття № 19. Магнітне поле в речовині. Енергія магнітного поля. …… 143
Практичне заняття № 20. Закон Фарадея-Максвелла. Індуктивність, самоіндукція. …… 145
Практичне заняття № 21. Змінний струм. …… 149
Практичне заняття № 22. Електромагнітні коливання і хвилі. …… 154
Задачі для самостійного розв'язування з електромагнетизму…….. 159
Література. ……..… 164

РОБОЧА ПРОГРАМА З ДИСЦИПЛІНИ ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Програма з ***електрики і магнетизму*** має на меті забезпечити базову фахову підготовку вчителів фізики відповідно до галузевого стандарту вищої освіти. Основу навчальної програми складають фундаментальні фізичні теорії, закони, наукові проблеми, мета яких – забезпечення якісної фундаментальної підготовки студентів і розвитку їх творчих здібностей.

Значна увага в програмі приділяється історії розвитку фізики, ознайомленню студентів із внеском українських учених у певну галузь фізичної науки, що має сприяти національно-патріотичному вихованню.

Побудова програми за блочно-модульною схемою спрямована на максимальну індивідуалізацію процесу навчання. Структура програми надає студентам можливість навчатись в індивідуальному темпі та орієнтуватись на певні рівні вимог щодо засвоєння навчального матеріалу.

За освітньо-професійною програмою підготовки бакалавра на вивчення курсу “Загальна фізика” на розділ Електрика і Магнетизм відводиться 324 навчальних годин в одному семестрі, що становить 9 кредитів.

Програма включає інваріантну та варіативну частини. Варіативна частина програми в тексті позначена (*).

Зміст програми враховує, що надалі будуть вивчатись теоретична фізика, методика навчання фізики, астрономія, електротехніка, радіоелектроніка тощо.

У програмі враховано, що курс загальної фізики визначає фундаментальну підготовку майбутнього вчителя фізики середньої школи. Особлива роль фізики визначається, перш за все, самим предметом вивчення, в якому розкривається зміст матерії і форм її руху, простору і часу як форм існування матерії, взаємозв'язку і взаємоперетворюваності видів матерії і рухів, єдності матеріального світу. В цьому полягає важливе методологічне і світоглядне значення вивчення загальної фізики. На основі вивчення класичної і квантової фізики, засвоєння фізичних теорій, фундаментальних понять і означень фізичних величин, змісту моделей, законів, принципів, формується цілісна сучасна фізична картина світу.

У процесі вивчення загальної фізики має сформуватись уявлення, що створення узагальнюючих теорій базується на величезному експериментальному матеріалі, який здобувається, зокрема, працею вчених; що фізика є основою сучасної техніки і технологій; що фізичні методи дослідження широко використовуються в астрономії, хімії, біології, метеорології, геології та інших галузях. Разом із вихованням у студентів поваги до науки повинна виховуватись і

повага до вчених. Важливо, щоб студенти саме педагогічних вищих навчальних закладів України знали про видатних українських учених-фізиків, основні напрями їх наукової діяльності і наукові здобутки. Під час навчання фізики необхідно знайомити студентів із найновішими досягненнями науки і техніки, нерозв'язаними в науці проблемами.

Особливість вивчення фізики в педагогічному університеті, інституті полягає в тому, що студенти мають оволодіти системою вмінь і навичок, які б давали можливість ефективно передавати знання учням, виховувати в них допитливість, інтерес до знань, любов до творчої праці.

Викладання курсу загальної фізики мусить мати сучасну дидактичну підтримку, зокрема, супроводжуватись лекційними демонстраціями, які б могли, окрім всього, бути зразком постановки шкільного експерименту і методики його використання.

Під час проведення практичних занять необхідно виробляти у студентів навички і необхідність постійно поповнювати теоретичні знання і використовувати їх під час розв'язування задач. На лабораторних заняттях студенти мають добре розібратися у досліджуваних фізичних явищах і законах, зрозуміти суть методів дослідження, набути навичок оцінювання технічних засобів, встановлення достовірності одержаних результатів, навчитись використовувати для аналізу результатів статистичні методи обробки результатів і сучасну обчислювальну техніку.

Робоча програма складена на основі галузевого стандарту вищої освіти зі спеціальності 6.010100 "Педагогіка і методика середньої освіти. Фізика", напряму підготовки 0101. "Педагогічна освіта" затвердженого МОН України.

ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Основні поняття: *електричний заряд, елементарний заряд, сила Кулона, електричне поле, діелектрична проникність середовища, напруженість електричного поля, електричний диполь, потенціал електричного поля, електрична ємність, конденсатори, діелектрики, провідники, поляризація діелектриків, енергія електростатичного поля, електричний струм, опір провідника, питома електропровідність, густина електричного струму, електрорушійна сила, робота та потужність електричного струму, електричне коло, квазістаціонарний струм, надпровідність, напівпровідники, p-n-перехід, напівпровідниковий діод, транзистор; робота виходу електрона з металу, контактна різниця потенціалів, термоелектричний струм, електронна лампа, електронно-променева трубка, термоелектронна емісія, електроліти, дисоціація, електроліз, джерело струму, іонізація, потенціал іонізації, несамостійний і самостійний газові розряди, плазма; магнітне поле, магнітний потік, індукція магнітного поля, сила Ампера, магнітний момент струму, сила Лоренца; діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, феримагнетики, електрорушійна сила індукції, самоіндукція, індуктивність, взаємна індукція; змінний струм,*

резонанс напруг, струмів; робота та потужність в колі змінного струму, трансформатор, коливальний контур, вимушені електричні коливання, електромагнітне поле, струм зміщення, електромагнітні хвилі, енергія електромагнітної хвилі, вектор Умова-Пойнтінга, випромінювання електромагнітних хвиль, принципи радіозв'язку, шкала електромагнітних хвиль.

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

Основні вміння: *застосовувати теоретичні основи електрики і магнетизму у навчальному процесі загальноосвітніх навчальних закладів; ставити демонстраційні експерименти з електрики і магнетизму, робити теоретичні узагальнення та вказувати практичні застосування; застосувати отримані знання для розв'язування задач, користуватися і знати будову:*

електровимірювальних приладів, мостів постійного та змінного струмів, радіоблоків, напівпровідникових випрямлячів, транзисторів, фотоелементів, осцилографа, електронного мікроскопа, лазера, радіаційних приладів, лічильників електричної енергії, трансформаторів; обирати методи та виконувати розрахунки кіл постійного та змінного струмів; обирати методи та виконувати вимірювання електрорушійної сили, сили струму, електричної напруги, електричного опору в колах постійного і змінного струмів, температури Кюрі; володіти уявленнями про електродинамічне моделювання процесів в електричних системах за певних умов.

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ У ВАКУУМІ

Вступ. Предмет та методи електрики і магнетизму. Короткий історичний огляд вчення про електрику і магнетизм. Розвиток електроенергетики в Україні.

Електростатика. Електричний заряд. Властивості електричного заряду. Два види заряду. Дискретність заряду. Інваріантність і закон збереження заряду. Елементарний заряд. Експериментальне визначення заряду електрона. Найпростіші заряджені тіла: модель точкового і неперервно розподіленого заряду. Взаємодія точкових заряджених тіл. Закон Кулона.

Електричне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції. Поле диполя. Потік вектора напруженості. Теорема Гаусса.

Робота сил електростатичного поля. Потенціальний характер електростатичного поля. Циркуляція вектора напруженості. Потенціал та різниця потенціалів. Рівняння Пуассона і Лапласа*. Потенціал та напруженість поля, створеного точковим зарядженим тілом, системою точкових заряджених тіл, диполем.

ПРОВІДНИКИ ТА ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Розподіл зарядів у провіднику. Провідники в електричному полі. Еквіпотенціальність поверхні провідника. Напруженість поля біля поверхні провідника та її зв’язок з поверхневою густиною заряду. Електризація через вплив. Врахування поля наведених зарядів. Електрофорна машина*. Електроємність. Конденсатори.

Діелектрики. Полярні і неполярні молекули. Вільні і зв’язані заряди. Поляризація діелектриків. Діелектрична проникність і сприйнятливість, вектор електричного зміщення. Неполярні діелектрики, теорія їх поляризації. Полярні діелектрики, теорія їх поляризації. Електричне поле на межі двох діелектриків. Граничні умови. Теорема Гаусса для поля в діелектрику. Сегнетоелектрики*. Електрети*. П'єзоелектрики*.

ЕНЕРГІЯ ВЗАЄМОДІЇ ЗАРЯДІВ. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

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

ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

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

Робота і потужність постійного струму. Закон Джоуля-Ленца.

Розгалужені кола, правила Кірхгофа та їх застосування.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ, ГАЗАХ ТА РІДИНАХ

Термоелектронна емісія. Залежність струму насичення від температури. Двохелектродні та трьохелектродні лампи і їх застосування*. Електронно-променева трубка*. Поняття про вторинну та автоелектронну емісії*.

Електроліти. Електролітична дисоціація. Електропровідність електролітів. Закон Ома для електролітів.

Електроліз. Закони Фарадея. Хімічні джерела струму. Використання електролізу. Процеси іонізації і рекомбінації. Несамостійний розряд в газах. Самостійний розряд в газах. Вольт-амперна характеристика газового розряду. Види розрядів (тліючий, дуговий, іскровий, коронний). Блискавка. Поняття про плазму. Використання газових розрядів. Катодні промені.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

Класифікація твердих тіл (провідники, діелектрики, напівпровідники). Електричний струм у металах. Досліди Мандельштама і Папалексі, Толмена і Стюарта. Класична електронна теорія провідності металів. Виведення законів Ома, Джоуля-Ленца*. Закон Відемана-Франца*.

Залежність опору металів від температури. Надпровідність. Поняття про квантову теорію провідності твердих тіл*. Провідність напівпровідників. Власна і домішкова провідність напівпровідників. Застосування напівпровідників.

ЕЛЕКТРИЧНІ КОНТАКТНІ ЯВИЩА

Робота виходу електрона з металу. Контактна різниця потенціалів. Контактні явища в напівпровідниках. Напівпровідникові діоди і транзистори.

Термоелектричний струм. Прямі та обернені термоелектричні явища. Термоелектричні генератори.

ПОСТІЙНЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ У ВАКУУМІ ТА РЕЧОВИНІ

Магнітна взаємодія струмів. Закон Ампера. Магнітне поле електричного струму. Індукція і напруженість магнітного поля. Закон Біо-Савара-Лапласа. Магнітне поле прямого, колового і соленоїдного струмів. Циркуляція вектора індукції магнітного поля*. Закон повного струму*. Контур із струмом у магнітному полі. Магнітний момент струму.

Дія електричного і магнітного полів на рухомий заряд. Сила Лоренца. Визначення питомого заряду електрона. Мас-спектрометр*. Ефект Холла і його застосування. Електронний мікроскоп*. Прискорювачі заряджених частинок*. Магнітогідродинамічні генератори*. Магнітне поле рухомого заряду*. Відносний характер електричного і магнітного полів.

Робота при переміщенні провідника зі струмом у магнітному полі. Магнітний потік.

Магнетики і намагнічування їх. Вектор намагнічення. Магнітне поле в магнетиках. Вектор напруженості магнітного поля. Магнітна сприйнятливість і проникність магнетиків. Зв'язок індукції і напруженості магнітного поля в магнетиках.

Магнітомеханічні і механомагнітні явища. Досліди Ейнштейна, де Гааза і Барнетта*. Діа-, пара- і феромагнетики. Магнітний гістерезис. Роботи Столєтова. Точка Кюрі. Постійні магніти. Нові магнітні матеріали*.

Магнітні кола*. Магніторушійна сила*. Закони магнітного кола*.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Досліди Фарадея. Електрорушійна сила індукції. Закон електромагнітної індукції Фарадея і правило Ленца. Вихрові струми. Скін-ефект. Самоіндукція і взаємоіндукція. Електрорушійна сила самоіндукції. Індуктивність.

Енергія магнітного поля струму. Енергія і густина енергії магнітного поля.

ЗМІННИЙ КВАЗІСТАЦІОНАРНИЙ СТРУМ. КВАЗІСТАЦІОНАРНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

Отримання змінної ЕРС. Квазістаціонарний струм. Діючі і середні значення струму і напруги. Опір, індуктивність і ємність у колі змінного струму. Закон Ома для кола змінного струму. Векторні діаграми і метод комплексних амплітуд*. Резонанс напруг, резонанс струмів*.

Робота і потужність змінного струму. Передавання електричної енергії. Трансформатор.

Електричний коливальний контур. Власні електричні коливання. Формула Томсона. Згасаючі коливання. Вимушені електричні коливання*. Резонанс*. Добротність і смуга пропускання контуру*.

Електричні автоколивання*. Автогенератор на транзисторі*.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ. РІВНЯННЯ МАКСВЕЛЛА

Вихрове електричне поле. Досліди Роуланда і Ейхенвальда. Електромагнітне поле. Струм зміщення. Система рівнянь Максвелла в інтегральній і диференціальній* формах.

Плоскі електромагнітні хвилі в однорідному середовищі, швидкість їх поширення. Випромінювання електромагнітних хвиль. Досліди Герца. Вібратор Герца. Енергія електромагнітної хвилі. Потік енергії. Вектор Умова-Пойнтінга.

Поняття про системи передачі електромагнітної енергії. Електромагнітні хвилі вздовж проводів. Тиск електромагнітних хвиль. Стоячі хвилі і резонанс у відрізках довгих ліній.

Винайдення радіозв'язку. Принцип радіозв'язку і радіолокації. Шкала електромагнітних хвиль.

МОДУЛЬНА СТРУКТУРА РОЗДІЛУ "ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ"

№ п/п модуля	Назва модуля	Всього годин	Лекції	Практичні заняття	Лабораторні заняття	Самостійна робота
ПП.05.03.ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ		**324**	**36**	**54**	**54**	**180**
1.	Електричне поле у вакуумі. Провідники та діелектрики в електричному полі. Енергія взаємодії зарядів. (Змістові модулі: ПП.05.03.01; ПП.05.03.02; ПП.05.03.03).	94	12	18	4	60
2.	Постійний електричний струм. Електропровідність, контактні явища. (Змістові модулі: ПП.05.03.04; ПП.05.03.05; ПП.05.03.06; ПП.05.03.07).	100	10	16	24	50
3.	Магнітне поле. Електромагнітна індукція. Квазістаціонарний струм. Електромагнітні хвилі. (Змістові модулі: ПП.05.03.08; ПП.05.03.09; ПП.05.03.10; ПП.05.03.11).	130	14	20	26	70

ОРІЄНТОВНИЙ ПЕРЕЛІК ТЕМ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Модуль 1. Електростатика

Теми практичних занять:

1. Взаємодія точкових зарядів. Закон Кулона.
2. Напруженість поля. Принцип суперпозиції.
3. Напруженість поля. Теорема Гаусса.
4. Потенціал поля.
5. Електроємність. Конденсатори.
6. З'єднання конденсаторів.
7. Електричне поле в діелектриках.
8. Енергія та густина енергії електричного поля.
9. Контрольна робота № 1

Модуль 2. Постійний струм

Теми практичних занять:

10. Постійний електричний струм. Закони Ома.
11. Опір провідників. З'єднання провідників.
12. Робота і потужність постійного струму. Закон Джоуля-Ленца.
13. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа.
14. Електропровідність твердих тіл.
15. Контактні явища в металах та напівпровідниках.
16. Електричний струм в електролітах, газах, вакуумі.
17. Контрольна робота № 2

Модуль 3. Електромагнетизм

Теми практичних занять:

18. Індукція і напруженість магнітного поля.
19. Взаємодія струмів. Закон Ампера. Сила Лоренца.
20. Магнітний потік. Робота по переміщенню провідника із струмом в магнітному полі.
21. Магнітне поле в речовині. Енергія магнітного поля.
22. Закон Фарадея-Максвелла.
23. Індуктивність, самоіндукція.
24. Змінний струм.

25. Електричні коливання.
26. *Контрольна робота № 3.*
27. Електромагнітні коливання і хвилі.
Контрольна робота № 3

ОРІЄНТОВНИЙ ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Перевірка теореми Гаусса.
Моделювання електростатичних полів з використанням електропровідного паперу.
Вивчення правил Кірхгофа
Дослідження залежності опору напівпровідників від температури.
Перевірка закону Ома для повного кола.
Вимірювання електрорушійної сили методом компенсації.
Вимірювання великих опорів за допомогою місткових схем (місток Уітстона).
Вимірювання малих опорів за допомогою місткових схем (модифікований місток Уітстона).
Вимірювання опорів за допомогою вольтметра та амперметра.
Вивчення будови акумулятора та вимірювання роботи і потужності в електричному колі.
Зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода.
Розширення меж вимірювання амперметра.
Розширення меж вимірювання вольтметра.
Градуювання вольтметра для вимірювання великих та малих опорів.
Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.
Визначення індукції магнітного поля між полюсами електромагніта за допомогою мілівеберметра.
Вивчення роботи електронного осцилографа.
Вимірювання питомого заряду (відношення заряду до маси) електрона методом магнетрона.
Вивчення явища термоелектронної емісії і вимірювання роботи виходу електрона.
Вивчення лічильника електричної енергії.
Дослідження роботи трансформатора.
Вивчення початкової магнітної проникності феритів.
Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки.
Визначення логарифмічного декремента згасання коливального контуру.
Визначення активного опору, індуктивності і ємності у колі змінного струму.
Дослідження паралельного резонансу в колі змінного струму.
Дослідження послідовного резонансу в колі змінного струму.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

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

Навчальна програма передбачає наступні види діяльності студентів:

- *пізнавальна діяльність*: інтелектуальні розумові дії, спостереження, дослід, усвідомлення проблеми, висування гіпотез, побудова моделей;
- *загально–навчальна діяльність*: пошук інформації, робота з літературою та іншими джерелами інформації, навички спілкування в колективній діяльності;
- *особистісно-реалізуюча діяльність*: пошук індивідуального змісту і цілей навчання фізики, особистісне розуміння фундаментальних понять і категорій, вибір індивідуального темпу навчання, самостійне визначення цілей, індивідуальний вибір додаткової тематики, індивідуальні обґрунтовані позиції, саморегуляція, самоаналіз і самоконтроль власної діяльності.

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

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

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

Основне завдання викладача на початку вивчення кожного модуля полягає у підготовці студентів до продуктивної самостійної діяльності, яка має відповідати рівню розвитку їх особистісних якостей, специфіці навчального матеріалу модуля, а також особистісній орієнтації навчання. Для ефективної

реалізації цього завдання викладачу необхідно забезпечити усвідомлення студентами тих питань змісту навчального матеріалу модуля, які мають методологічний характер і спрямовані на формування в студентів сучасних уявлень про фізичну картину світу, методи наукового пізнання, історію розвитку фізичних теорій тощо.

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

Кожний змістовий модуль, як правило, супроводжується комплексом різноманітних дидактичних засобів навчання, що забезпечують наочність матеріалу і сприяють досягненню конкретних цілей навчання. Модулі, що вміщують цільову програму дій, банк інформації та методичних вказівок для її засвоєння, змінюють характер взаємостосунків між викладачами і студентами.

Модульна технологія навчання загальної фізики включає три компоненти: змістовий, організаційний і контрольно-оцінювальний з його стимулюючою функцією.

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

Проведення практичних занять із загальної фізики має на **меті**:

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

- закріплення, узагальнення і повторення навчального матеріалу.

В результаті проведення практичних занять студенти повинні:

Знати:

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

Уміти:

- здійснювати різні способи подання фізичних задач, зокрема, малюнком, графіком, схемою, системою рівнянь, моделлю, спостереженням, експериментом, скороченим письмовим записом;
- розкривати фізичний зміст задачі;
- раціонально записати умову задачі;
- відшукувати і вводити додаткові умови;
- проводити пошуки шляхів розв’язування задачі і складати загальний план розв’язку;
- вибирати раціональний спосіб розв’язку задачі;
- ставити і давати відповіді на запитання як часткового, так і загального характеру;
- проводити аналіз та оцінку здобутих результатів;
- складати задачу із заданої теми з використанням сучасних знань;
- розв'язувати експериментальні задачі;
- використовувати в процесі розв'язування задач сучасні засоби навчання;
- реалізовувати цілі і завдання розв'язування задач з фізики в середній школі.

Метою проведення **лабораторних занять є**:

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

В результаті проведення **лабораторних занять студенти повинні**

Знати:

- методи емпіричного пізнання об`єктивної дійсності;
- сутність і методи реалізації експерименту;

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

Уміти:

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

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

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

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

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЗНАНЬ І УМІНЬ

Залік та екзамен є формами підсумкового контролю результатів навчання студентів і мають на меті перевірку системності засвоєння програмового матеріалу, цілісності бачення навчального курсу, рівня осмислення знань та набуття умінь, їх комплексного застосування у практичній діяльності, діагностування ефективності самостійної навчальної роботи студентів.

Для запобігання репродуктивного характеру перевірки знань і умінь при проведенні заліку та екзамену передбачається використання теоретичних і практичних питань, задач різного ступеню складності, а також творчих завдань з метою виявлення можливих рівнів засвоєння студентами змісту навчального курсу.

Відмітка „зараховано” виставляється студенту при умові виконання вимог, передбачених у змісті навчальної програми, а саме:

- регулярному відвідуванні лекційних, практичних, лабораторних занять без пропусків або їх незабарному відпрацюванні, своєчасному складанні колоквіумів, лабораторних робіт та інших форм поточного контролю, виконанні контрольних і розрахункових робіт з позитивними результатами;
- поглибленні набутих знань у процесі самостійної роботи, опрацюванні наукової інформації;
- засвоєнні змісту навчального курсу в обсязі, передбаченому галузевим стандартом вищої освіти.

Відмітка „незараховано” виставляється студенту в тому випадку, якщо його навчальна діяльність не відповідає вище означеним вимогам.

При оцінюванні за 100-бальною шкалою результатів навчання студентів, що використовується в Інституті фізико-математичної та інформатичної освіти і науки Національного педагогічного університету імені М.П.Драгоманова, та за шкалою ECTS доцільно користуватися критеріями оцінювання рівня знань і умінь, поданими нижче.

Критерії оцінювання рівня засвоєння студентами теоретичних знань

Оцінка ECTS	**Критерії оцінювання навчальних досягнень**	**За 100-бальною шкалою**	**За національною шкалою**
A	Студент опанував програмовий матеріал на рівні систематизації і узагальнення, уміло використовує наукову термінологію, самостійно визначає мету дослідження та вказує можливості її реалізації, володіє методами наукового пізнання та проблематикою певної наукової галузі, виявляє евристичні здібності, реалізує комплекс ідей щодо	91-100	Відмінно

	самостійного одержання знань та їх опрацювання, виконує методологічні, організаційні, самоорганізаційні види освітньої діяльності. Встановлює причинно-наслідкові зв'язки між фізичними явищами, вміло розкриває зміст фізичних теорій та наводить дослідні факти, що їх підтверджують, самостійно здійснює аналіз та формулює висновки, застосовує здобуті знання і уміння відповідно до поставлених цілей, виявляє обізнаність із науковими проблемами і має уявлення щодо можливих шляхів їх розв'язання. Студент вільно володіє програмовим матеріалом, уміло використовує наукову термінологію, виявляє обізнаність із науковою інформацією, обізнаний із історією розвитку фізики та внеском українських вчених у певну галузь фізичної науки, розуміється у фізичних теоріях та дослідних фактах, що їх підтверджують.		
B	Студент володіє програмовим матеріалом, науковою термінологією, виявляє обізнаність з фізичними теоріями та дослідними фактами, що лежать в основі їх розробки, розкриває обсяг та зміст фізичних понять, характеризує суттєві ознаки досліджуваних об'єктів, аналізує та узагальнює набуті знання, володіє знаннями з історії розвитку фізичних досліджень в Україні	81-90	Дуже добре
C	Студент виявляє правильне розуміння фізичного змісту розглядуваних явищ і закономірностей, законів і теорій, визначає умови та границі їх застосування, встановлює взаємозв'язки між фізичними поняттями, виділяє серед них фундаментальні, формулює проблеми з теми, за допомогою викладача робить висновки та	71-80	Добре

	систематизує інформацію		
D	Студент відтворює значну частину програмового матеріалу, розпізнає фізичні теорії, наводить приклади дослідних фактів, що їх підтверджують, вміє охарактеризувати та проаналізувати основні положення теми, виконує деякі доведення, виведення, за допомогою викладача пояснює фізичні явища та визначає умови, за яких вони відбуваються	61-70	Задовільно
E	Студент обізнаний із фізичними явищами, їх причинами та відмінностями, виявляє знання основних положень, правил, закономірностей і законів, вміє їх сформулювати, записує основні формули, розкриває зміст елементарних фізичних понять, володіє репродуктивними способами пізнання	51-60	Достатньо
Fx	Студент виявляє елементарні знання основних понять, закономірностей, правил, законів, обізнаний із фізичними величинами, одиницями їх вимірювання, описує фізичні явища	31-50	Незадовільно з можливістю повторного складання
F	Студент не опанував змісту навчального курсу в обсязі, передбаченому галузевим стандартом вищої освіти, виявляє обізнаність із деякими елементарними фізичними поняттями, за допомогою викладача розрізняє фізичні явища без їх характеристики, називає окремі фізичні величини та одиниці їх вимірювання	0-30	Незадовільно з обов’язковим повторним вивченням курсу

ДИДАКТИЧНА КАРТА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

(ЗРАЗОК)

Для студентів 2 фіа курсу

Погоджено

Директор Інституту ФМІОН
професор Г.О.Грищенко_____

Затверджено на засіданні кафедри загальної фізики 18 січня 2007р.
Протокол №_____
Зав. Кафедри професор
М.І.Шут_____

За навчальним планом:
4 семестр, 18 тижнів, 324 годин, 9 кредитів ECTS
Лекції 36 год (1 лекція щотижня), практичні 54 год (1,5 занять щотижня), лабораторні 54 год (1,5 занять щотижня),
3 контрольні роботи, 1 розрахунково-графічна робота, 1 колоквіум, екзамен

Лекції: доцент Т.Г.Січкар
Практичні: доцент Т.Г.Січкар, доцент С.І.Бондаренко
Лабораторні: доцент Т.Г.Січкар, доцент П.О.Возний, доцент С.І.Бондаренко

	Теми лекцій	**Тематика практичних занять**	**контроль рівня знань**	**к-сть балів**
Модуль № 1. ЕЛЕКТРОСТАТИКА				
1	Електричне поле у вакуумі	1.Закон Кулона. 2. Напруженість поля. Принцип суперпозиції		
2	Провідники в електричному полі	3. Теорема Гауса.		
3	Електроємність. Конденсатори	4. Потенціал поля. 5. Електроємність. Конденсатори		
4	Електричне поле в діелектриках	6. З'єднання конденсаторів.		
5	Енергія електричного поля	7. Електричне поле в діелектриках 8. Енергія електричного поля.	К.С.Р.-1 Колол №1	2 10
Модуль № 2 ПОСТІЙНИЙ СТРУМ.				
6	Закони Ома.	9. Контрольна робота № 1.	К.Р.№1 к.прак-1 к. лаб 1	5 3 5
			За модуль № 1	***25***
7	Електропровідність тв тіл. Напівпровідники.	10. Закони Ома. 11. З'єднання опорів.		
8	Термоелектронна емісія.	12. Закон Джоуля-Ленца.		
9	Контактні явища	13. Правила Кірхгофа. 14. Електропровідність тв-дих тіл.	К.прак-2	3
10	Струм в електролітах та газах.	15. Контактні явища.	к. лаб 2 Колок №2	5 10
Модуль № 3 ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.				
11	Магнітне поле.	16. Електричний струм в вакуумі, електролітах і газах. 17. Контрольна робота № 2.	К.С.Р.-2 К.Р.№ 2 Розрахункові	2 5 5
			За модуль № 2	***30***
12	Магнітні властивості речовин	18. Напруженість магнітного поля		
13	Електромагнітна індукція.	19. Сила Лоренца. 20. Робота по переміщенню		

		провідника із струмом.		
14	Квазістаціонарні струми.	21. Магнітне поле в речовині. Енергія магнітного поля.		
15	Електричні коливання.	22. Закон Фарадея-Максвела. 23. Індуктивність. Самоіндукція.	к.прак-3 К.С.Р.-3	3 2
16	Електромагнітне поле.	24. Змінний струм.	Колок №3	10
17	Електромагнітні хвилі.	25. Електричні коливання. 26. Контрольна робота № 3.	К.Р. №3	5
18		27. Електромагнітні хвилі.	к. лаб 3	5
			За модуль № 3	***25***
			Екзамен	***20***
			Загалом	***100***

Теоретичний курс. Контроль у вигляді складання 3-х колоквіумів (Колок) та контролю самостійної роботи (К.С.Р.) **Разом :**	**36 балів**
Практичні заняття. Контроль у вигляді 3-х контрольних робіт (К.Р.), систематичного контролю роботи на практичних заняттях (к.прак) (відвідування, фізичні диктанти, експрес-завдання то що),графічно-розрахункова робота **Разом :**	**29 балів**
Лабораторні заняття. Контроль вчасності та якості виконання, своєчасності захисту, оформлення, активність (к.лаб)	**15 балів**
ЕКЗАМЕН	**20 балів**
Всього :	**Max 100 балів**
Додаткові види діяльності: участь у роботі гуртка, реферати Переможець олімпіади з фізики, Наукові публікації	**2 бали** **5 бали** **5 балів**

Література:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: Навчальний посібник. –Т. 2.: Електрика і магнетизм. – К.: Техніка, 2001. – 452 с.
2. Січкар Т.Г. Електрика і магнетизм, Модуль № 1 Електростатика: Навчальний посібник – К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2004. – 109 с.
3. Січкар Т.Г. Електрика і магнетизм, Модуль № 2 Постійний струм: Навчальний посібник – К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2004. – 122 с.
4. Загальний курс фізики: Збірник задач/ І.П. Гаркуша, І.Т. Горбачук, В.П. Курінний та ін./ За заг.ред. І.П. Гаркуші. – К.: Техніка., 2003.– 560 с.
5. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1985.- 576с.
6. Загальний курс фізики. Збірник задач: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. – К.: Вища школа, 1993. – 359 с.
7. Загальна фізика. Лабораторний практикум: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. – К.: Вища школа, 1992. – 509 с.
8. Шут М.І., Сташкевич О.М., Касперський А.В., Січкар Т.Г. Електрика і магнетизм. – К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2002. – 236 с.
9. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. – М.: Наука, 1977. – 687 с.
10. Сборник задач по общему курсу физики. Под ред. Цедрика М.С. М.: Просвещение, 1989 г. - 271с.
11. Касперський А.В., Богданов І.Т. Електрика та магнетизм. Збірник задач, вправ і тестів. - К. 2006.-248с.

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ПРАВИЛА, ОЗНАЧЕННЯ.

Модуль № 1. Електростатика.

Електричний заряд - специфічна властивість речовини, яка проявляється у взаємодії тіл з іншими тілами, що характеризуються такою ж властивістю. Ця властивість притаманна деяким елементарним частинкам і пов'язана з їх електромагнітною взаємодією.

Закон збереження електричного заряду: Електричні заряди не створюються і не зникають. Вони можуть лише передаватись від одного тіла до другого або переміщуватись (перерозподілятись) в об'ємі одного і того ж тіла. Або: Алгебраїчна сума електричних зарядів в замкненій системі залишається незмінною.

Закон Кулона: Сила взаємодії F двох нерухомих точкових зарядів в вакуумі прямо пропорційна добутку значень цих зарядів q1 та q2 і обернено пропорційна квадрату відстані r між ними і направлена (напрямлена) вздовж прямої, яка їх з'єднує. (Якщо заряди однойменні - вони відштовхуються, якщо різнойменні – притягуються).

Один Кулон - це така кількість електрики (заряд), який проходить через поперечний переріз провідника за 1 секунду при незмінному струмі в 1 Ампер.

Діелектричною проникністю середовища називають величину, яка показує в скільки разів зменшується сила взаємодії електричних зарядів при переносі їх з вакуума в дане середовище.

Електричне поле - одна з форм матерії, нерозривно зв'язана з елементарними зарядами, через яку відбувається взаємодія електричних зарядів. Якщо електричні заряди нерухомі і, відповідно до цього, характеристики поля в будь - якій точці незмінні, то таке поле називають електростатичним. Електричне поле у вакуумі розповсюджується зі швидкістю 3□108м/с.

Напруженістю електричного поля у довільній його точці називають фізичну величину чисельно рівну силі з якою діє поле на одиничний позитивний пробний заряд, внесений в цю точку поля. Напруженість - вектор направлений в бік дії сили.

Однорідним - називають поле, в усіх точках якого вектор напруженості за величиною і напрямком залишається сталим.

Принцип суперпозиції (накладання) говорить про незалежність полів створених різними зарядженими тілами. Це означає що результуюча напруженість поля, створеного декількома зарядами, рівна сумі напруженостей полів створених в даній точці усіма цими зарядами.

Сукупність ліній напруженості через довільну плоску поверхню утворює потік вектора напруженості.

Теорема Остроградського-Гаусса: Потік вектора електричної напруженості через довільну замкнену поверхню чисельно рівний алгебраїчній сумі зарядів, вміщених всередину цієї поверхні, поділеній на добуток електричної сталої на діелектричну проникність.

Потенціальними або консервативними називаються поля, в яких при будь-якому виборі початкової та кінцевої точок переміщення робота не залежить від форми шляху, по якому рухався заряд, а визначається лише положенням початкової та кінцевої точок

Потенціал даної точки електростатичного поля це фізична величина, чисельно рівна роботі, яку виконують електростатичні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду з даної точки поля в нескінченність.

Різницею потенціалів між двома точками поля називають роботу, яку виконують сили поля при переміщенні одиничного заряду по довільному шляху з однієї точки в іншу.

Один Вольт - це різниця потенціалів між двома такими точками поля, робота по переміщенню заряда в один Кулон між якими дорівнює одному Джоулю.

Явище перерозподілу вільних носіїв заряду в провіднику під дією зовнішнього електричного поля, внаслідок чого виникає електризація, називається електризацією через вплив або електростатичною індукцією.

Заряди, що виникають внаслідок електризації через вплив на поверхнях провідника називаються наведеними зарядами.

Електроємністю провідника називається фізична величина чисельно рівна тій кількості електрики, яке необхідно надати провіднику, щоб змінити його потенціал на одиницю (один Вольт).

Один Фарад - це ємність такого провідника, в якому зміна заряду на 1Кл супроводжується зміною потенціалу в 1В.

Два близько розташовані однакових за величиною, але протилежних за знаком заряди утворюють електричний диполь. Відстань між зарядами називається плечем диполя, а добуток заряду на плече називається дипольним моментом.

Діелектрики, молекули яких є диполями називаються полярними діелектриками. Для полярних діелектриків характерна орієнтаційна поляризація.

Неполярними називаються діелектрики, центри позитивних і негативних зарядів молекул, з яких вони складаються, за нормальних умов збігаються. Для неполярних діелектриків характерна поляризаця зміщення (електронна поляризація).

Поляризація зміщення неполярних діелектриків, орієнтаційна поляризація полярних діелектриків та іонна поляризація іонних кристалів приводить до появи на протилежних гранях діелектрика в електричному полі різнойменних (індукованих) зарядів. Заряди, які виникають на поверхні діелектрика внаслідок його поляризації, називають зв’язаними.

Вектором поляризації називається електричний момент одиниці об'єму поляризованого діелектрика. Модуль вектора поляризації чисельно рівний поверхневій густині зв'язаних зарядів.

Діелектрична сприйнятливість речовини – фізична величина чисельно рівна сумі поляризованостей всіх молекул в одиниці об'єму діелектрика.

Вектор індукції характеризує поле, створене вільними зарядами, вектор поляризації - поле створене зв'язаними зарядами. Напруженість - характерерзує результуюче поле створене як вільними так і зв'язаними зарядами.

Піроелектрика - (від грецького pyr - вогонь) це явище виникнення електричних зарядів на поверхні діелектричних кристалів при їхньому нагріванні. Виникнення на поверхні кристалів зв'язаних зарядів при зміні температури називають прямим піроелектричним ефектом, а самі кристали піроелектриками.

Сегнетоелектриками називають полярні кристалічні діелектрики, які в певному інтервалі температур спонтанно поляризовані. Величина спонтанної поляризації суттєво залежить від зовнішніх факторів, таких як електричне поле, зміна температури тощо. Від піроелектриків сегнетоелектрики відрізняються тим, що величина і напрям спонтанної поляризації їх можуть бути змінені навіть у порівняно слабких електричних полях.

Температура, вище якої в сегнетоелектрику відбувається фазовий перехід, в результаті якого сегнетоелектричні властивості зникають, і кристал переходить в звичайний неполярний діелектрик називають температурою Кюрі (точкою Кюрі).

Явище виникнення на гранях кристалів зв'язаних зарядів при їхній механічній деформації називають прямим п'єзоелектричним ефектом (від грецького piezo - тиснути). П'єзоелектричний ефект притаманний лише іонним кристалам.

Електрети – діелектрики, які будучи один раз наелектризованими, довго зберігають свій наелектризований стан. Електрети створюють навколо себе постійне електричне поле і є аналогами постійних магнітів.

Модуль № 2. Постійний струм.

Заряджені частинки, здатні переміщуватись під дією електричного поля називаються **носіями електричного заряду**.

Направлений потік носіїв електричного заряду в вакуумі або середовищі називається електричним струмом провідності (**електричним струмом**).

Струм, величина і напрям якого з часом не змінюється, називається **постійним струмом**.

Різниця потенціалів, яка завжди існує на кінцях провідника, по якому проходить постійний електричний струм називається **напругою** або **спадом напруги**. Необхідною умовою існування електричного струму в провіднику є відмінна від нуля напруга на його кінцях.

Сила струму - фізична величина, яка вимірює кількість електрики, що проходить через поперечне січення провідника за 1 секунду.

Один Ампер - це такий сила незмінного струму, який проходячи по двом паралельним прямолінійним нескінченним провідникам дуже малого круглого січення розташованим в вакуумі на відстані 1м один від одного, викликає силу взаємодії між ними $2 \cdot 10^{-7}$Н на кожний метр довжини провідників.

Густина струму – фізична величина чисельно рівна силі струму, що припадає на одиницю площі поперечного січення провідника. Густина струму – вектор, що співпадає з напрямом руху позитивних заряддів.

Закон Ома для простої ділянки кола: сила струму в провіднику прямо пропорційна до прикладеної напруги.

Один Ом це опір такого провідника, в якому напруга на його кінцях в 1В викликає струм 1А.

Питомий опір речовини – фізична величина чисельно рівна опору провідника одиничної довжини з одиничним поперечним січенням при температурі 0^0С:

Електрорушійна сила (*e.p.c.*) - фізична величина чисельно рівна роботі сторонніх сил по переміщенню одиничного заряду вздовж замкнутої лінії напруженості електричного поля постійного струму.

Розгалуженим називається коло постійного струму, в якому є точки з'єднання трьох і більше провідників. Такі точки, в яких сходяться три або більше струмів, називаються **вузлами**.

Перше правило Кірхгофа: Алгебраїчна сума струмів, які сходяться до кожного вузла, дорівнює нулеві.

Друге правило Кірхгофа: У довільному простому замкненому контурі розгалуженого кола алгебраїчна сума спадів напруг на окремих ділянках контуру дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що ввімкнуті в цей контур.

Закон Джоуля-Ленца: Кількість теплоти, яка виділяється постійним струмом у провіднику, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника і часу проходження струму.

Тверді тіла по їх здатності проводити електричний струм можна розділити на **провідники, напівпровідники, діелектрики**. **Провідники** характеризуються значенням питомого опору $\rho \approx 10^{-7}$–10^{-3} Ом·м. **Напівпровідники** характеризуються значеннями питомого опору $\rho \approx 10^{-3}$–10^{+5} Ом·м. Для **діелектриків (ізоляторів)** характерні значення $\rho \geq 10^{+5}$ Ом·м. Якісна відмінність між металами і напівпровідниками проявляється в характері температурної залежності питомого опору. Для металів зменшення температури приводить до зменшення питомого опору, і при наближенні до абсолютного нуля опір металів прямує до нуля. Для напівпровідників, навпаки, із зменшенням температури опір зростає, і поблизу абсолютного нуля напівпровідник по своїм провідним властивостям стає ізолятором.

Явище зникнення електричного опору в провідниках з електронним типом провідності при зменьшенні температури нижче деякої (критичної) називається **надпровідністю.**

Провідність, що створюється рухом дірок у валентній зоні, називається **дірковою провідністю р-типу.** Провідність, обумовлена рухом електронів в зоні провідності називається **електронною провідністю n-типу**.

Провідність, зумовлена переважно домішковими атомами, називається **домішковою провідністю.**. Домішки, що збільшують провідність електронного типу, називаються **донорними**, вони збільшують густину вільних електронів в напівпровіднику.

Домішки, що збільшують провідність діркового типу, називаються акцепторними, вони викликають появу "додаткових дірок" в напівпровіднику.

Електрони в напівпровідниках n-типу, а дірки –в напівпровідниках р-типу називаються основними носіями струму.

Позитивний потенціал внутрішньої частини металу відносно навколишнього вакууму називається внутрішнім потенціалом.

Явище виривання електронів з металу називається **емісією**. Емісія, яка виникає під дією теплового руху електронів називається **термоелектронною емісією**.

Перший закон Вольта: При з'єднанні двох провідників, виготовлених з різних металів, між ними виникає **контактна різниця потенціалів** (*К.Р.П.*), яка залежить лише від хімічного складу і температури.

Другий закон Вольта: Контактна різниця потенціалів між кінцями розімкнутого кола, що складається з послідовно з'єднаних провідників, які знаходяться при однаковій температурі, не залежить від хімічного складу проміжних провідників. Вона дорівнює *контактній різниці потенціалів*, що виникає при безпосередньому з'єднанні крайніх провідників.

Дві причини виникнення ***К.Р.П***: Неоднакова робота виходу електронів з різних металів. Неоднакова концентрація електронів в різних металах.

Процес розпаду нейтральних молекул речовини на позитивно і негативно заряджені іони називають **електролітичною дисоціацією**. В результаті утворюються *катіони і аніони*.

Рухливістю іона називають величину дрейфової швидкості, якої набуває частинка під дією електричного поля, напруженістю, яка дорівнює одиниці.

Електролізом називають сукупність електрохімічних реакцій, які відбуваються поблизу електродів в електролітах при проходженні крізь них постійного струму. При цьому на електродах виділяється чиста речовина або виникають нові хімічні з'єднання.

Перший закон Фарадея для електролізу: маса речовини, яка виділяється на одному з електродів, прямо пропорційна величині заряду, який пройшов через електроліт.

Другий закон Фарадея полягає в тому, що для всіх хімічних елементів електрохімічний еквівалент прямо пропорційний хімічному еквіваленту.

Явище відриву електронів від молекул газу, яке приводить до утворення в газі вільних електронів і позитивних іонів та обумовлює його електропровідність, називається **іонізацією**.

Енергія, необхідна для відривання від нейтрального атому одного (першого) електрону називається **енергією** або **роботою іонізації**.

При зіткненні позитивні іони можуть захоплювати електрони. Позитивні і негативні іони газів можуть з'єднуватись між собою з утворенням нейтральних молекул і атомів. Цей процес обернений до іонізації називається **рекомбінацією.**

Стан газу, при якому кількість пар іонів, що утворились в наслідок іонізації стає рівною кількості нейтральних атомів або молекул, що за цей же час виникли внаслідок рекомбінації, називається **динамічною рівновагою**.

Електричний струм, обумовлений електропровідністю газу, яку він набув в результаті неперервної дії на нього зовнішніх джерел іонізації називається **несамостійним розрядом**.

Розряд, який при досить великій різниці потенціалів розпочався як несамостійний, сам створює необхідні для підтримання розряду іони. Струм не буде припинятись і після припинення дії іонізатора. Такий розряд називається **самостійним**.

Іонізація ударам – вид іонізації, коли під впливом сил поля іон отримав велику швидкість і при зіткненні з молекулою може її розколоти на іони або вибити з неї електрони, тобто іонізувати її.

Тліючий розряд – це самостійний розряд, при якому катод випромінює електрони внаслідок бомбардування його позитивними іонами, що утворюються в газі. Тліючий розряд спостерігається в розріджених газах при падінні напруги поблизу катоду $\approx 150 \div 300 B$.

Іскровий розряд – самостійний розряд, що виникає між двома електродами в повітрі за нормальних тисків і високих напруженостях електричного поля. Для повітря пробій починається при критичній напруженості $\boldsymbol{E_{кр}} \approx 3 \cdot 10^6 В/м$. Даний розряд супроводжується звуковим ефектом – внаслідок ударної хвилі, що утворюється при підвищення тиску до сотень атмосфер і температурах $\boldsymbol{T} \approx 100000^0$C.

Стример – це локальні області підвищеної провідності газу.

Блискавка - це іскровий електричний розряд в нижніх шарах атмосфери.

Дуговий розряд можна отримати з іскрового. При появі іскри зменшується опір кола, і за рахунок вибивання електронів з електроду (*термоелектронна емісія*) в ньому виникає дуговий розряд. Його температура може досягати 4000К і більше при $\boldsymbol{U} \approx 30 \div 40 B$.

Коронний розряд це проміжний розряд між тліючим і іскровим. На відміну від іскрового в коронному розряді має місце неповний пробій газового проміжку, так як електронні лавини не проходять через весь шар газу. Коронний розряд спостерігається при досить високий тисках (наприклад - атмосферних) в сильно неоднорідних полях.

Плазма – це високо іонізований квазінейтральний газ.

Модуль № 3. Електромагнетизм.

Закон Ампера: Сила дії $d\vec{F}_{12}$ першого елемента струму $I_1 d\vec{l}_1$ на другий елемент $dI_2 d\vec{l}_2$ прямо пропорційна добутку цих елементів струмів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними і залежить від їх взаємної орієнтації.

Магнітне поле - особлива форма існування матерії, через яку відбувається взаємодія рухомих електричних зарядів, провідників із струмом чи постійних магнітів.

Вектор індукції магнітного поля – фізична величина, рівна силі, з якою магнітне поле діє на елемент струму одиничної довжини, по якому проходить струм силою в один Ампер, розташований перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля. Вектор магнітної індукції у довільній точці поля співпадає за напрямком з напрямом сили, що діє на північний полюс нескінченно малої магнітної стрілки.

Для визначення напрямку дії сили Ампера користуються правилом лівої руки: якщо лінії індукції магнітного поля входять в долонь, чотири випрямлені пальці співпадають з напрямком струму в провіднику, то відігнутий на 900 великий палець вкаже напрям дії сили.

Лініями магнітної індукції називаються лінії, дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямом вектора індукції в цих точках поля. Лінії магнітної індукції завжди замкнуті і охоплюють провідники із струмом.

Напрям ліній індукції визначається за **правилом свердлика**: якщо поступальний рух сверлика співпадає з напрямком струму, то напрям обертання рукоятки сверлика співпадає з напрямком вектора індукції.

Закон Біо – Савара – Лапласа: Елементарна напруженість прямо пропорційна силі струму, який створює магнітне поле, довжині елемента провідника, обернено пропорційна квадрату відстані і залежить від кута між напрямком струму та радіус-вектором, проведеним від елемента струму до точки, в якій визначають напруженість магнітного поля.

Принцип суперпозиції: напруженість магнітного поля в будь - якій точці поля, створеного декількома струмами, дорівнює сумі напруженостей магнітних полів, створених в цій точці кожним окремим струмом.

Соленоїдом називають довгу циліндричну котушку, яка складається з багатьох однакових, соосних, щільноукладених витків дроту, що утворюють гвинтову лінію.

Закон повного струму: Циркуляція вектора напруженості магнітного поля постійного електричного струму вздовж замкненого контуру дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які охоплює цей контур.

Магнітне поле, на відміну від електростатичного, не є потенціальним. Поля, для яких циркуляція вектора напруженості відмінна від нуля називаються вихровими.

Напрямок дії сили Лоренца визначається за **правилом лівої руки**: Якщо ліву руку розташувати таким чином, що чотири пальці співпадають з напрямом руху позитивних зарядів а лінії індукції магнітного поля входять в долоню, то відігнутий на 90^0 великий палець вкаже напрям сили, що діє з боку магнітного поля на цей рухомий заряд.

Магнітним потоком або **потоком вектора магнітної індукції** крізь площадку називають фізичну величину, яка дорівнює добутку проекції вектора на величину площадки.

Один Вебер - це магнітний потік створений магнітним полем, індукцією в Один Тесла крізь одиничну площадку, перпендикулярну до вектора індукції.

Речовини, здатні впливати на магнітне поле, створене струмами провідності та сталими магнітами, називаються **магнетиками**.

Магнітне поле в речовині розглядається як таке, що складається з **зовнішнього** поля, обумовленого макрострумами провідності в провідниках та **внутрішнього** (власного) поля, яке створюється в результаті намагнічення речовини.

Речовини, в атомах яких орбітальні та спінові магнітні моменти електронів при відсутності зовнішнього магнітного поля взаємно скомпенсовані, називають **діамагнетиками**. Магнітна сприйнятливість діамагнетиків від'ємна і за величиною дуже мала.

Речовини, атоми, молекули, іони або ядра яких мають власний магнітний момент навіть при відсутності зовнішнього поля, називають **парамагнетиками**. Магнітна сприйнятливість парамагнетиків при кімнатних температурах має значення на один – два порядки більші від магнітної сприйнятливості діамагнетиків.

Діамагнітний і парамагнітний ефекти зникають при знятті зовнішнього магнітного поля. На відміну від них **феромагнітний ефект** зберігається і при знятті зовнішнього магнітного поля. **Феромагнетики** підсилюють зовнішнє магнітне поле в сотні або тисячі разів за рахунок спонтанного намагнічування великих ділянок речовини (доменів).

Температура, при досягненні якої ділянки спонтанного намагнічування розпадаються і феромагнетик втрачає свої специфічні властивості (перетворюється в звичайний парамагнетик), називається **температурою Кюрі**.

Явище виникнення в замкнутому провіднику електричного струму при зміні магнітного потоку, що проходить крізь контур провідника, називають **електромагнітною індукцією**.

Закон Фарадея: електрорушійна сила індукції, яка вивникає при зміні магнітного потоку через контур провідника, прямо пропорційна швидкості зміни цього потоку.

Магнітний потік дорівнює кількості силових ліній магнітної індукції, що перетинають площину контура.

Правило Ленца: індукційний струм в замкнутому провіднику завжди має такий напрям, що створений цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потока, який збудив індукційний струм.

При рівномірному обертанні рамки в магнітному полі в ній виникатиме **електрорушійна сила індукції**, яка в часі буде змінюватися за синусоїдним законом.

Явище виникнення е.р.с. індукції в провіднику при змінах власного магнітного потоку, пов'язаних із зміною струму в цьому провіднику називається **самоіндукцією**. Е.р.с. самоіндукції пов'язана із зміною струму. Вона пропорційна до швидкості зміни струму.

Індуктивність котушки чисельно рівна тій е.р.с. самоіндукції, яка виникає в ній при зміні струму в 1 *А/с*.

Якщо котушки розмістити так, що магнітний потік однієї з них частково перетинає другу котушку, то говорять що вони **індуктивно зв'язані**, або між ними виникає **взаємоіндукція**.

Коефіцієнт взаємоіндукції - це міра магнітного зв'язку між двома контурами (котушками), що характеризує їх здатність збуджувати е.р.с. індукції в одній з них при зміні струму в другій.

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ПРАВИЛА, ОЗНАЧЕННЯ.

Модуль № 1. Електростатика.

Електричний заряд - специфічна властивість речовини, яка проявляється у взаємодії тіл з іншими тілами, що характеризуються такою ж властивістю. Ця властивість притаманна деяким елементарним частинкам і пов'язана з їх електромагнітною взаємодією.

Закон збереження електричного заряду: Електричні заряди не створюються і не зникають. Вони можуть лише передаватись від одного тіла до другого або переміщуватись (перерозподілятись) в об'ємі одного і того ж тіла. Або: Алгебраїчна сума електричних зарядів в замкненій системі залишається незмінною.

Закон Кулона: Сила взаємодії $\boldsymbol{F}$ двох нерухомих точкових зарядів в вакуумі прямо пропорційна добутку значень цих зарядів $\boldsymbol{q_1}$ та $\boldsymbol{q_2}$ і обернено пропорційна квадрату відстані $\boldsymbol{r}$ між ними і направлена (напрямлена) вздовж прямої, яка їх з'єднує. (Якщо заряди однойменні - вони відштовхуються, якщо різнойменні – притягуються).

Один Кулон - це така кількість електрики (заряд), який проходить через поперечний переріз провідника за 1 секунду при незмінному струмі в 1 Ампер.

Діелектричною проникністю середовища називають величину, яка показує в скільки разів зменшується сила взаємодії електричних зарядів при переносі їх з вакуума в дане середовище.

Електричне поле - одна з форм матерії, нерозривно зв'язана з елементарними зарядами, через яку відбувається взаємодія електричних зарядів. Якщо електричні заряди нерухомі і, відповідно до цього, характеристики поля в будь - якій точці незмінні, то таке поле називають електростатичним. Електричне поле у вакуумі розповсюджується зі швидкістю $3 \cdot 10^8$м/с.

Напруженістю електричного поля у довільній його точці називають фізичну величину чисельно рівну силі з якою діє поле на одиничний позитивний пробний заряд, внесений в цю точку поля. Напруженість - вектор направлений в бік дії сили.

Однорідним - називають поле, в усіх точках якого вектор напруженості за величиною і напрямком залишається сталим.

Принцип суперпозиції (*накладання*) говорить про незалежність полів створених різними зарядженими тілами. Це означає що результуюча напруженість поля, створеного декількома зарядами, рівна сумі напруженостей полів створених в даній точці усіма цими зарядами.

Сукупність ліній напруженості через довільну плоску поверхню утворює **потік вектора напруженості.**

Теорема Остроградського-Гаусса: Потік вектора електричної напруженості через довільну замкнену поверхню чисельно рівний алгебраїчній сумі зарядів, вміщених всередину цієї поверхні, поділеній на добуток електричної сталої на діелектричну проникність.

Потенціальними або **консервативними** називаються поля, в яких при будь-якому виборі початкової та кінцевої точок переміщення робота не залежить від форми шляху, по якому рухався заряд, а визначається лише положенням початкової та кінцевої точок

Потенціал даної точки електростатичного поля це фізична величина, чисельно рівна роботі, яку виконують електростатичні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду з даної точки поля в нескінченність.

Різницею потенціалів між двома точками поля називають роботу, яку виконують сили поля при переміщенні одиничного заряду по довільному шляху з однієї точки в іншу.

Один Вольт - це різниця потенціалів між двома такими точками поля, робота по переміщенню заряда в один Кулон між якими дорівнює одному Джоулю.

Явище перерозподілу вільних носіїв заряду в провіднику під дією зовнішнього електричного поля, внаслідок чого виникає електризація, називається **електризацією через вплив** або **електростатичною індукцією**.

Заряди, що виникають внаслідок електризації через вплив на поверхнях провідника називаються **наведеними зарядами**.

Електроємністю провідника називається фізична величина чисельно рівна тій кількості електрики, яке необхідно надати провіднику, щоб змінити його потенціал на одиницю (один Вольт).

Один Фарад - це ємність такого провідника, в якому зміна заряду на 1Кл супроводжується зміною потенціалу в 1В.

Два близько розташовані однакових за величиною, але протилежних за знаком заряди утворюють **електричний диполь**. Відстань між зарядами називається плечем диполя, а добуток заряду на плече називається **дипольним моментом**.

Діелектрики, молекули яких є диполями називаються **полярними діелектриками**. Для полярних діелектриків характерна **орієнтаційна поляризація**.

Неполярними називаються діелектрики, центри позитивних і негативних зарядів молекул, з яких вони складаються, за нормальних умов збігаються. Для неполярних діелектриків характерна **поляризаця зміщення** *(електронна поляризація)*.

Поляризація зміщення неполярних діелектриків, орієнтаційна поляризація полярних діелектриків та іонна поляризація іонних кристалів приводить до появи на протилежних гранях діелектрика в електричному полі різнойменних (індукованих) зарядів. Заряди, які виникають на поверхні діелектрика внаслідок його поляризації, називають **зв'язаними**.

Вектором поляризації називається електричний момент одиниці об'єму поляризованого діелектрика. Модуль вектора поляризації чисельно рівний поверхневій густині зв'язаних зарядів.

Діелектрична сприйнятливість речовини – фізична величина чисельно рівна сумі поляризованостей всіх молекул в одиниці об'єму діелектрика.

Вектор індукції характеризує поле, створене вільними зарядами, **вектор поляризації** - поле створене зв'язаними зарядами. **Напруженість** - характерерзує результуюче поле створене як вільними так і зв'язаними зарядами.

Піроелектрика - (від грецького ***pyr*** - вогонь) це явище виникнення електричних зарядів на поверхні діелектричних кристалів при їхньому нагріванні. Виникнення на поверхні кристалів зв'язаних зарядів при зміні температури називають прямим піроелектричним ефектом, а самі кристали **піроелектриками**.

Сегнетоелектриками називають полярні кристалічні діелектрики, які в певному інтервалі температур спонтанно поляризовані. Величина спонтанної

поляризації суттєво залежить від зовнішніх факторів, таких як електричне поле, зміна температури тощо. Від піроелектриків сегнетоелектрики відрізняються тим, що величина і напрям спонтанної поляризації їх можуть бути змінені навіть у порівняно слабких електричних полях.

Температура, вище якої в сегнетоелектрику відбувається фазовий перехід, в результаті якого сегнетоелектричні властивості зникають, і кристал переходить в звичайний неполярний діелектрик називають **температурою Кюрі** (*точкою Кюрі*).

Явище виникнення на гранях кристалів зв'язаних зарядів при їхній механічній деформації називають прямим **п'єзоелектричним ефектом** (від грецького ***piezo*** - тиснути). П'єзоелектричний ефект притаманний лише іонним кристалам.

Електрети – діелектрики, які будучи один раз наелектризованими, довго зберігають свій наелектризований стан. Електрети створюють навколо себе постійне електричне поле і є аналогами постійних магнітів.

Модуль № 2. Постійний струм.

Заряджені частинки, здатні переміщуватись під дією електричного поля називаються **носіями електричного заряду**.

Направлений потік носіїв електричного заряду в вакуумі або середовищі називається електричним струмом провідності (**електричним струмом**).

Струм, величина і напрям якого з часом не змінюється, називається **постійним струмом**.

Різниця потенціалів, яка завжди існує на кінцях провідника, по якому проходить постійний електричний струм називається **напругою** або **спадом напруги**. Необхідною умовою існування електричного струму в провіднику є відмінна від нуля напруга на його кінцях.

Сила струму - фізична величина, яка вимірює кількість електрики, що проходить через поперечне січення провідника за 1 секунду.

Один Ампер - це такий сила незмінного струму, який проходячи по двом паралельним прямолінійним нескінченним провідникам дуже малого круглого січення розташованим в вакуумі на відстані 1м один від одного, викликає силу взаємодії між ними $2 \cdot 10^{-7}$Н на кожний метр довжини провідників.

Густина струму – фізична величина чисельно рівна силі струму, що припадає на одиницю площі поперечного січення провідника. Густина струму – вектор, що співпадає з напрямом руху позитивних заряддів.

Закон Ома для простої ділянки кола: сила струму в провіднику прямо пропорційна до прикладеної напруги.

Один Ом це опір такого провідника, в якому напруга на його кінцях в 1В викликає струм 1А.

Питомий опір речовини – фізична величина чисельно рівна опору провідника одиничної довжини з одиничним поперечним січенням при температурі 0^0С:

Електрорушійна сила (*e.p.c.*) - фізична величина чисельно рівна роботі сторонніх сил по переміщенню одиничного заряду вздовж замкнутої лінії напруженості електричного поля постійного струму.

Розгалуженим називається коло постійного струму, в якому є точки з'єднання трьох і більше провідників. Такі точки, в яких сходяться три або більше струмів, називаються **вузлами**.

Перше правило Кірхгофа: Алгебраїчна сума струмів, які сходяться до кожного вузла, дорівнює нулеві.

Друге правило Кірхгофа: У довільному простому замкненому контурі розгалуженого кола алгебраїчна сума спадів напруг на окремих ділянках контуру дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що ввімкнуті в цей контур.

Закон Джоуля-Ленца: Кількість теплоти, яка виділяється постійним струмом у провіднику, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника і часу проходження струму.

Тверді тіла по їх здатності проводити електричний струм можна розділити на **провідники, напівпровідники, діелектрики**. **Провідники** характеризуються значенням питомого опору $\rho \approx 10^{-7}$–10^{-3} Ом·м. **Напівпровідники** характеризуються значеннями питомого опору $\rho \approx 10^{-3}$–10^{+5} Ом·м. Для **діелектриків (ізоляторів)** характерні значення $\rho \geq 10^{+5}$ Ом·м. Якісна відмінність між металами і напівпровідниками проявляється в характері температурної залежності питомого опору. Для металів зменшення температури приводить до зменшення питомого опору, і при наближенні до абсолютного нуля опір металів прямує до нуля. Для напівпровідників, навпаки, із зменшенням температури опір зростає, і поблизу абсолютного нуля напівпровідник по своїм провідним властивостям стає ізолятором.

Явище зникнення електричного опору в провідниках з електронним типом провідності при зменьшенні температури нижче деякої (критичної) називається **надпровідністю.**

Провідність, що створюється рухом дірок у валентній зоні, називається **дірковою провідністю p-типу.** Провідність, обумовлена рухом електронів в зоні провідності називається **електронною провідністю n-типу**.

Провідність, зумовлена переважно домішковими атомами, називається **домішковою провідністю.**. Домішки, що збільшують провідність електронного типу, називаються **донорними**, вони збільшують густину вільних електронів в напівпровіднику.

Домішки, що збільшують провідність діркового типу, називаються ***акцепторними***, вони викликають появу "додаткових дірок" в напівпровіднику.

Електрони в напівпровідниках **n**-типу, а дірки –в напівпровідниках **p**-типу називаються **основними носіями струму**.

Позитивний потенціал внутрішньої частини металу відносно навколишнього вакууму називається **внутрішнім потенціалом**.

Явище виривання електронів з металу називається **емісією**. Емісія, яка виникає під дією теплового руху електронів називається **термоелектронною емісією**.

Перший закон Вольта: При з'єднанні двох провідників, виготовлених з різних металів, між ними виникає **контактна різниця потенціалів** (*К.Р.П.*), яка залежить лише від хімічного складу і температури.

Другий закон Вольта: Контактна різниця потенціалів між кінцями розімкнутого кола, що складається з послідовно з'єднаних провідників, які знаходяться при однаковій температурі, не залежить від хімічного складу проміжних провідників. Вона дорівнює *контактній різниці потенціалів*, що виникає при безпосередньому з'єднанні крайніх провідників.

Дві причини виникнення ***К.Р.П***: Неоднакова робота виходу електронів з різних металів. Неоднакова концентрація електронів в різних металах.

Процес розпаду нейтральних молекул речовини на позитивно і негативно заряджені іони називають **електролітичною дисоціацією**. В результаті утворюються *катіони і аніони*.

Рухливістю іона називають величину дрейфової швидкості, якої набуває частинка під дією електричного поля, напруженістю, яка дорівнює одиниці.

Електролізом називають сукупність електрохімічних реакцій, які відбуваються поблизу електродів в електролітах при проходженні крізь них постійного струму. При цьому на електродах виділяється чиста речовина або виникають нові хімічні з'єднання.

Перший закон Фарадея для електролізу: маса речовини, яка виділяється на одному з електродів, прямо пропорційна величині заряду, який пройшов через електроліт.

Другий закон Фарадея полягає в тому, що для всіх хімічних елементів **електрохімічний еквівалент** прямо пропорційний **хімічному еквіваленту**.

Явище відриву електронів від молекул газу, яке приводить до утворення в газі вільних електронів і позитивних іонів та обумовлює його електропровідність, називається **іонізацією**.

Енергія, необхідна для відривання від нейтрального атому одного (першого) електрону називається **енергією** або **роботою іонізації**.

При зіткненні позитивні іони можуть захоплювати електрони. Позитивні і негативні іони газів можуть з'єднуватись між собою з утворенням нейтральних молекул і атомів. Цей процес обернений до іонізації називається **рекомбінацією.**

Стан газу, при якому кількість пар іонів, що утворились в наслідок іонізації стає рівною кількості нейтральних атомів або молекул, що за цей же час виникли внаслідок рекомбінації, називається **динамічною рівновагою**.

Електричний струм, обумовлений електропровідністю газу, яку він набув в результаті неперервної дії на нього зовнішніх джерел іонізації називається **несамостійним розрядом**.

Розряд, який при досить великій різниці потенціалів розпочався як несамостійний, сам створює необхідні для підтримання розряду іони. Струм не буде припинятись і після припинення дії іонізатора. Такий розряд називається **самостійним**.

Іонізація ударам – вид іонізації, коли під впливом сил поля іон отримав велику швидкість і при зіткненні з молекулою може її розколоти на іони або вибити з неї електрони, тобто іонізувати її.

Тліючий розряд – це самостійний розряд, при якому катод випромінює електрони внаслідок бомбардування його позитивними іонами, що утворюються в газі. Тліючий розряд спостерігається в розріджених газах при падінні напруги поблизу катоду $\approx 150 \div 300 B$.

Іскровий розряд – самостійний розряд, що виникає між двома електродами в повітрі за нормальних тисків і високих напруженостях електричного поля. Для повітря пробій починається при критичній напруженості $\boldsymbol{E_{кр}} \approx 3 \cdot 10^6 В/м$. Даний розряд супроводжується звуковим ефектом – внаслідок ударної хвилі, що утворюється при підвищення тиску до сотень атмосфер і температурах $\boldsymbol{T} \approx 100000^0$C.

Стример – це локальні області підвищеної провідності газу.

Блискавка - це іскровий електричний розряд в нижніх шарах атмосфери.

Дуговий розряд можна отримати з іскрового. При появі іскри зменшується опір кола, і за рахунок вибивання електронів з електроду (*термоелектронна емісія*) в ньому виникає дуговий розряд. Його температура може досягати 4000К і більше при $\boldsymbol{U} \approx 30 \div 40 B$.

Коронний розряд це проміжний розряд між тліючим і іскровим. На відміну від іскрового в коронному розряді має місце неповний пробій газового проміжку, так як електронні лавини не проходять через весь шар газу. Коронний розряд спостерігається при досить високий тисках (наприклад - атмосферних) в сильно неоднорідних полях.

Плазма – це високо іонізований квазінейтральний газ.

Модуль № 3. Електромагнетизм.

Закон Ампера: Сила дії $d\vec{F}_{12}$ першого елемента струму $I_1 d\vec{l}_1$ на другий елемент $dI_2 d\vec{l}_2$ прямо пропорційна добутку цих елементів струмів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними і залежить від їх взаємної орієнтації.

Магнітне поле - особлива форма існування матерії, через яку відбувається взаємодія рухомих електричних зарядів, провідників із струмом чи постійних магнітів.

Вектор індукції магнітного поля – фізична величина, рівна силі, з якою магнітне поле діє на елемент струму одиничної довжини, по якому проходить струм силою в один Ампер, розташований перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля. Вектор магнітної індукції у довільній точці поля співпадає за напрямком з напрямом сили, що діє на північний полюс нескінченно малої магнітної стрілки.

Для визначення напрямку дії *сили Ампера* користуються **правилом лівої руки**: якщо лінії індукції магнітного поля входять в долонь, чотири випрямлені пальці співпадають з напрямком струму в провіднику, то відігнутий на 90^0 великий палець вкаже напрям дії сили.

Лініями магнітної індукції називаються лінії, дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямом вектора індукції в цих точках поля. Лінії магнітної індукції завжди замкнуті і охоплюють провідники із струмом.

Напрям ліній індукції визначається за **правилом свердлика**: якщо поступальний рух сверлика співпадає з напрямком струму, то напрям обертання рукоятки сверлика співпадає з напрямком вектора індукції.

Закон Біо – Савара – Лапласа: Елементарна напруженість прямо пропорційна силі струму, який створює магнітне поле, довжині елемента провідника, обернено пропорційна квадрату відстані і залежить від кута між напрямком струму та радіус-вектором, проведеним від елемента струму до точки, в якій визначають напруженість магнітного поля.

Принцип суперпозиції: напруженість магнітного поля в будь - якій точці поля, створеного декількома струмами, дорівнює сумі напруженостей магнітних полів, створених в цій точці кожним окремим струмом.

Соленоїдом називають довгу циліндричну котушку, яка складається з багатьох однакових, соосних, щільноукладених витків дроту, що утворюють гвинтову лінію.

Закон повного струму: Циркуляція вектора напруженості магнітного поля постійного електричного струму вздовж замкненого контуру дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які охоплює цей контур.

Магнітне поле, на відміну від електростатичного, не є потенціальним. Поля, для яких циркуляція вектора напруженості відмінна від нуля називаються **вихровими**.

Напрямок дії сили Лоренца визначається за **правилом лівої руки**: Якщо ліву руку розташувати таким чином, що чотири пальці співпадають з напрямом руху позитивних зарядів а лінії індукції магнітного поля входять в долоню, то відігнутий на 90^0 великий палець вкаже напрям сили, що діє з боку магнітного поля на цей рухомий заряд.

Магнітним потоком або **потоком вектора магнітної індукції** крізь площадку називають фізичну величину, яка дорівнює добутку проекції вектора на величину площадки.

Один Вебер - це магнітний потік створений магнітним полем, індукцією в Один Тесла крізь одиничну площадку, перпендикулярну до вектора індукції.

Речовини, здатні впливати на магнітне поле, створене струмами провідності та сталими магнітами, називаються **магнетиками**.

Магнітне поле в речовині розглядається як таке, що складається з **зовнішнього** поля, обумовленого макрострумами провідності в провідниках та **внутрішнього** (власного) поля, яке створюється в результаті намагнічення речовини.

Речовини, в атомах яких орбітальні та спінові магнітні моменти електронів при відсутності зовнішнього магнітного поля взаємно скомпенсовані, називають **діамагнетиками**. Магнітна сприйнятливість діамагнетиків від'ємна і за величиною дуже мала.

Речовини, атоми, молекули, іони або ядра яких мають власний магнітний момент навіть при відсутності зовнішнього поля, називають **парамагнетиками**. Магнітна сприйнятливість парамагнетиків при кімнатних температурах має значення на один – два порядки більші від магнітної сприйнятливості діамагнетиків.

Діамагнітний і парамагнітний ефекти зникають при знятті зовнішнього магнітного поля. На відміну від них **феромагнітний ефект** зберігається і при знятті зовнішнього магнітного поля. **Феромагнетики** підсилюють зовнішнє магнітне поле в сотні або тисячі разів за рахунок спонтанного намагнічування великих ділянок речовини (доменів).

Температура, при досягненні якої ділянки спонтанного намагнічування розпадаються і феромагнетик втрачає свої специфічні властивості (перетворюється в звичайний парамагнетик), називається **температурою Кюрі**.

Явище виникнення в замкнутому провідникові електричного струму при зміні магнітного потоку, що проходить крізь контур провідника, називають **електромагнітною індукцією**.

Закон Фарадея: електрорушійна сила індукції, яка вивникає при зміні магнітного потоку через контур провідника, прямо пропорційна швидкості зміни цього потоку.

Магнітний потік дорівнює кількості силових ліній магнітної індукції, що перетинають площину контура.

Правило Ленца: індукційний струм в замкнутому провіднику завжди має такий напрям, що створений цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потока, який збудив індукційний струм.

При рівномірному обертанні рамки в магнітному полі в ній виникатиме **електрорушійна сила індукції**, яка в часі буде змінюватися за синусоїдним законом.

Явище виникнення е.р.с. індукції в провіднику при змінах власного магнітного потоку, пов'язаних із зміною струму в цьому провіднику називається

самоіндукцією. Е.р.с. самоіндукції пов'язана із зміною струму. Вона пропорційна до швидкості зміни струму.

Індуктивність котушки чисельно рівна тій е.р.с. самоіндукції, яка виникає в ній при зміні струму в 1 *А/с*.

Якщо котушки розмістити так, що магнітний потік однієї з них частково перетинає другу котушку, то говорять що вони **індуктивно зв'язані**, або між ними виникає **взаємоіндукція**.

Коефіцієнт взаємоіндукції - це міра магнітного зв'язку між двома контурами (котушками), що характеризує їх здатність збуджувати е.р.с. індукції в одній з них при зміні струму в другій.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ПОРАДИ ПРИ АНАЛІЗІ І РОЗВ'ЯЗУВАННІ ЗАДАЧ

Розв'язування задач є одним з основних видів діяльності студентів при вивченні розділу "Електрика і магнетизм". При розв'язуванні задач, так само як і при виконанні лабораторних робіт, можна максимально індивідуалізувати процес навчання, що практично недосяжно при читанні лекцій. Фізичні задачі та вправи бувають надзвичайно корисними для постановки ряду проблем, перевірки якості засвоєння матеріалу, повторення та узагальнення матеріалу, формуванні практичних умінь, розвитку творчих здібностей студентів то що.

Задачі з фізики поділяють на експериментальні, графічні та текстові, які в свою чергу поділяються на розрахункові та якісні. Найбільш поширений вид задач – текстові.

Процес розв'язування фізичних задач становить собою пошук засобів виходу з практичних, реальних складних умов, процес досягнення мети, яка з першого погляду здається недосяжною.

Ця діяльність обумовлена особливістю інтелекту, що є наданням навчально-пізнавальної об'єктивної реальності, діяльності людини. Розв'язування задачі таке ж вміння як плавати, кататися на лижах чи ковзанах, грати на музичному інструменті. Навчитись розв'язувати задачі можна лише при глибокому розумінні теоретичних основ науки, наслідуючи кращі приклади методичних підходів та постійно тренуючись. Усі дії при розв'язуванні задачі повинні нагадувати виконання певного алгоритму. Він може бути різним для кожної особистості. Проте є певні загальні підходи. А тому необхідно:

- Уважно прочитати умову задачі та зробити короткий запис. При цьому всі числові значення величин повинні бути виражені в основних одиницях міжнародної системи одиниць (***SI***). Бажано скорочено записати її словесні характеристики. Наприклад: «*у стані спокою* - $\vec{\upsilon}$***=const***»; «рухається рівноприскорено - ***a=const***»; «*опором елемента знехтувати* - ***R=0***» тощо. Сюди ж треба вписати необхідні табличні дані та, якщо необхідно, значення

фундаментальних констант - швидкість поширення світла, заряд і маса електрона, стала Планка, електрична та магнітна сталі та інш.

- Зробити малюнок або схему, які мають бути точними, у будь-якій проекції, без значних спотворень пропорцій та кутів, у зручному маштабі. На малюнку або схемі проставити вказані в умові величини, позначити знаки зарядів, напрями струмів, рухів, прискорень, діючих сил, тощо.
- Поставити перед собою запитання: “Що відбувається?”, “Яке явище, процес має місце?”. Відповіді на ці питання мають бути виділенням найбільш важливого, головного з фізичної точки зору. Після формулювання відповіді на ці запитання знайти відповідь на питання: “Чому це явище (цей процес, ця ситуація) відбувається?”. Відповідь на це питання потрібно записати в математичному вигляді. Це може бути один із законів фізики, співвідношення балансу енергії або інших величин (математичний запис результату експерименту, функціональний зв’язок між величинами) тощо.
- Після математичного запису основної ідеї, яка визначає стан або процес, описаний в умові, потрібно з’ясувати яку величину необхідно знайти (“Що невідомо?”) і, якщо це зразу можливо, виразити її узагальненою формулою. Далі з’ясувати які величини невідомі та намітити план подальшої роботи по їх відшуканню. При цьому корисно питати себе: “Що ще невідомо?”, “Яке положення умови ще не використано?” тощо.
- Довести розв’язок до кінця у загальному вигляді. Перевірити одиниці шуканої величини. Для цього у праву частину одержаної формули потрібно підставити основні одиниці даних величин і шляхом перетворень та скорочень переконатись у правильності розмірності отриманої величини.
- провести обчислення та записати остаточну відповідь. Результат обчислень може бути наближеним. Тоді можна скористатися відомим правилом: значення відповіді повинно включати на одну значущу цифру більше, ніж у вихідних даних.
- Після того як дістали числове значення шуканої величини, потрібно оцінити правильність (реальність) цього значення. Для цього дати собі відповідь на запитання: “Чи може таке значення бути?” Всі задачі фізики пов’язані з станами та процесами об’єктивної реальності, тому всі значення які дістають при розв’язуванні задач повинні бути реальними. Не може маса Землі дорівнювати 5×10^{5} кг, а швидкість світла 2×10^{15} м/с, напруженість поля в конденсаторі 3×10^{12} В/м, а ємність провідної кулі 10Ф то що. Для оцінки подібних значень можна порівняти їх з відомими табличними або досить поширеними – густина, діелектрична проникність води, електропровідність міді, швидкість поширення світла у вакуумі, ємність Землі і таке інше. Це не є абсолютним і обов’язковим методом. У кожного можуть бути особисті методи та прийоми оцінки значень фізичних величин, своя інформація. До такого аналізу необхідно готуватись і виконувати його при розв’язуванні не лише фізичних задач.
- В окремих фізичних задачах потрібно графічно зображати певні залежності між величинами. Слід пам’ятати, що в конкретній задачі ця графічна залежність має бути не “взагалі”, а конкретно відповідати умові даної задачі. При цьому

знову слід пам’ятати, що всі графічні залежності відповідають реальним процесам. Не може, наприклад, графік координати рухомої матеріальної точки мати розрив або злам. Бо розрив означав би нескінченну за значенням швидкість, а злам – нескінченно велике прискорення в даний момент.

МОДУЛЬ №1 “ЕЛЕКТРОСТАТИКА“

ПОРАДИ ДО РОЗВ`ЯЗКУ ЗАДАЧ З ЕЛЕКТРОСТАТИКИ.

Основне завдання, яке ставиться при розв’язку задач з електростатики полягає у ***встановленні основних характеристик поля*** - $\vec{E}, \vec{D}, \varphi$ ***в залежності від розташування зарядів, їх кількості, властивостей середовища, а також у з’ясуванні особливостей взаємодії електричних зарядів і полів та електричних зарядів між собою***.

Типові задачі даного розділу можуть бути об’єднані в такі основні групи:

1. Обчислення сил взаємодії між зарядженими тілами, розміщеними в одній площині та просторово розміщених.
2. Визначення напруженості електричного поля, яке створене одним зарядом або системою зарядів.
3. Визначення потенціалу електричного поля.
4. Задачі, в яких сили взаємодії і параметри електричного поля обумовлені розподілом зарядів вздовж ізольованого провідника заданої форми і розмірів.
5. Визначення силових та енергетичних параметрів при внесенні провідників чи діелектриків в електричне поле.

При розв’язуванні кожної групи задач використовуються загальні для цієї групи задач способи, фізичні закономірності.

- Так при розв`язуванні задач, що ввійшли до першої групи, слід пам’ятати, що силу взаємодії між точковими зарядами обчислюють за законом Кулона. При цьому враховують:

а) що сила, з якою діє кожен точковий заряд, є величина векторна;
б) взаємодія декількох зарядів підлягає принципу суперпозиції;
в) якщо лінійні розміри заряджених тіл співрозмірні, або більші відстані взаємодії, чи в інших складних випадках, коли утруднений перехід до уявлень про точкові заряди, тоді силу взаємодії між зарядженими тілами краще обчислювати за формулою $\vec{F} = \vec{E} \cdot q$, де $\vec{E}$ – напруженість поля, яке створене усіма зарядами (окрім заряду q) в точці розміщення заряду q.

- При розв`язуванні задач, які віднесені до другої групи, виходимо з того, що потрібно визначити напруженість поля, що створене системою зарядів. Їх можна розв`язати, в основному, двома способами:

а) обчислюючи напруженість поля точкового заряду з використанням принципу суперпозиції; б) за допомогою теореми Остроградського-Гаусса;

Застосовуючи перший спосіб до таких задач, в яких заряди розподілені по поверхні чи об'єму тіла, їх розбивають на елементарні заряди, до яких застосовують формули напруженості поля точкового заряду. При цьому використовується принцип суперпозиції полів створених різними зарядами. Тобто, напруженість результуючого поля, яке створене двома елементарними зарядами q_1 і q_2, що знаходяться на певній відстані один від одного, визначається як векторна сума напруженостей кожного заряду в даній точці окремо: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

Якщо елементарних зарядів багато, то інтегруванням напруженостей полів елементарних зарядів визначають сумарну напруженість, яка створена зарядженим тілом, пам`ятаючи, що потрібно сумувати тільки ті складові напруженостей елементарних зарядів, які співпадають з напрямком результуючого вектора напруженості поля, створеного всіма зарядами тіла.

Інтегральною формулою теореми Остроградського - Гаусса зручно користуватись тоді, коли з міркувань симетрії можна вибрати поверхню правильної геометричної форми, яка б охоплювала заряди, вказати напрям ліній напруженості. Вибираючи поверхню, що охоплює заряди, слід пам`ятати, що величини напруженості поля в кожній точці поверхні мають бути однакові.

- Якщо індукція і напруженість електричного поля є векторними величинами, і дії по їх визначенню підлягають правилам векторної алгебри, то інша, не менш важлива енергетична характеристика поля – *потенціал* φ – є скалярною величиною. Для визначення потенціалу поля можливі два методи.

1) якщо поле утворене системою довільно розміщених точкових зарядів, то в будь - якій точці простору потенціал поля системи визначається *алгебраїчною сумою* потенціалів полів, створених окремо взятими зарядами.

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i}$$

Цей метод розрахунку потенціалу може бути застосований і тоді, коли заряд неперервно розподілений у просторі, тобто для будь - якого зарядженого тіла.

2) Але такий метод розрахунку потенціалу для точок поля, що утворене нескінченною зарядженою ниткою чи пластиною, приведе до значення потенціалу, що дорівнює нескінченності. Тобто, результат не має фізичного змісту. В такому випадку користуються формулою, що встановлює зв`язок між напруженістю поля і градієнтом потенціалу

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl}.$$

У цьому випадку, інтегруючи вираз $\varphi = -\int E_l dl$, можна знайти різницю потенціалів між точками на скінченних відстанях від джерела поля, де напруженість поля визначається з достатньою практичною точністю.

Отже, якщо існує вираз для напруженості поля будь-якої системи зарядів, то інтегруванням його у відповідних межах можна визначити значення потенціалу цього поля.

- при розв’язуванні задач, що віднесені до четвертої групи, слід пам’ятати, що :

а) умовою електростатичної рівноваги на провіднику є рівність нулю напруженості електростатичного поля в середині провідника;
б) вектор напруженості в будь-якій точці поверхні провідника перпендикулярний до неї, а значення потенціалу має бути однакове в усіх точках провідника.

Поверхня з таким значенням потенціалу є еквіпотенціальною. Отже, задачі по визначенню розподілу заряду на поверхні ізольованого провідника є задачами по визначенню розподілу густини зарядів на елементах поверхні провідника, якщо в середині провідника в усіх точках потенціал має однакове значення. При цьому формула для визначення потенціалу має вигляд

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_S \frac{\sigma dS}{r}.$$

де r - відстань від точки з зазначеним потенціалом до поверхні dS.

- При розв’язуванні задач, що віднесені до п’ятої групи, слід мати на увазі:

а) фізичні процеси і закономірності у внесених в електричні поле провідниках обумовлені наявністю вільних зарядів, а в діелектриках – наявністю зв’язаних зарядів, тобто в провіднику відбуваються перерозподіл зарядів на поверхні, а діелектрик поляризується;
б) напруженість поля всередині провідника дорівнює нулеві E=0.
в) існує зв’язок між поверхневою густиною зв’язаних зарядів на межі діелектрик-провідник і густиною вільних зарядів на провіднику:

$$\sigma' = \sigma_o \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}$$

г) силові лінії на межі двох ізотропних діелектриків заломлюються;
д) провідники можуть бути заземлені і ізольовані.

ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ І ФОРМУЛИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ РОЗВ’ЯЗУВАННІ ЗАДАЧ З ЕЛЕКТРОСТАТИКИ.

Сила взаємодії двох точкових зарядів (закон Кулона):

$$F = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2};\quad \text{де } \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = k = 9\times10^9 \text{ м/Ф} \quad \varepsilon_0 = 8{,}85\times10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

Напруженість електричного поля та принцип суперпозиції:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}; \qquad \vec{E}_\Sigma = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_n$$

Напруженість електричного поля точкового заряду:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\varepsilon r^2}$$

Напруженість електричного поля утвореного диполем у довільній точці на відстані ***l***:

$$E = \frac{p}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l^3}\sqrt{1+3\cos^2\theta}$$

У випадку неможливості скористатись закономірностями для точкових зарядів, потрібно застосувати теорему Остроградського - Гаусса та висновків з неї

$$N_E = \oint E_n ds = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{k} q_i$$

Напруженість електричного поля площини:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}, \quad \text{тут } \sigma \text{ поверхнева густина заряду } \sigma = \frac{q}{S}$$

Напруженість поля між двома нескінченими рівномірно зарядженими площинами з поверхневою густиною заряду σ (плоский конденсатор)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

Напруженість електричного поля нескінченного прямого провідника і поля за межами циліндра на відстані *l* від осі

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l},$$

де $\tau = \frac{q}{l}$ лінійна густина зарядів; ***l*** - довжина провідника

Для циліндра з радіусом *R* на відстані ***r***

$$E = \frac{\sigma \cdot R}{2\varepsilon\varepsilon_0 r}$$

Для неоднорідного поля

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}$$

Робота електричного поля по переміщенню заряду q з точки 1 в точку 2

$$A = -\Delta W = q\int_1^2 E_l dl = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

де E_l – проекція вектора напруженості $\vec{E}$ на напрям $\vec{dl}$.

Поведінка діелектрика в електричному полі характеризується вектором поляризації $\vec{P}$. Для ізотропного діелектрика

$$\vec{P} = \chi\varepsilon_0 \vec{E}_d$$

$\vec{E}_d$ – напруженість електричного поля всередині діелектрика,
χ – діелектрична сприйнятливість діелектрика, $\chi = \varepsilon - 1$. Поверхнева густина σ' зв`язаних зарядів чисельно дорівнює проекції вектора $\vec{P}$ на зовнішню нормаль до поверхні діелектрика

$$\sigma' = P_n$$

Для ізотропного діелектрика вектор електричної індукції поля та вектор напруженості пов`язані формулою:

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

Безпосередньо з теореми Остроградського - Гаусса для діелектриків випливає:

$$\boxed{\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}}$$

Здатність провідника накопичувати електричні заряди характеризується його електроємністю С. Для довільного відокремленого провідника

$$C = \frac{dq}{d\varphi}.$$

Для двох провідників, що розділені шаром діелектрика:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

Ємність плоского конденсатора: $C = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$;

Ємність циліндричного конденсатора: $C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 h}{\ln R_2 / R_1}$.

де h – висота циліндрів, R_1 – радіус внутрішнього циліндра,
R_2 – радіус зовнішнього циліндра;

Ємність сферичного конденсатора: $C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}$.

При послідовному з`єднанні конденсаторів:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i};$$

При паралельному їх з`єднанні:

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i .$$

Енергія системи нерухомих зарядів:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} q_s \varphi_i .$$

Енергія зарядженого конденсатора:

$$W = \frac{q^2}{2C} \qquad W = \frac{q\ U}{2} \qquad W = \frac{CU^2}{2}$$

Енергія електричного поля:

$$W = \frac{1}{2} DEV.$$

Густина енергії електричного поля:

$$\text{або } \omega = \frac{1}{2} DE; \qquad \omega = \frac{1}{2} \frac{D^2}{\varepsilon\varepsilon_0}; \qquad \omega = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2.$$

У випадку неоднорідного поля:

$$W = \int_V \omega dV .$$

Практичне заняття № 1.

ВЗАЄМОДІЯ ТОЧКОВИХ ЗАРЯДІВ. ЗАКОН КУЛОНА.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 18.1-18.5, 18.7-18.11
дома: [5] 3.1-3.12

Задача № 1.1.

За теорією Бора електрон рухається в атомі водню навколо ядра по коловій орбіті радіуса R=0,53 А°. Визначити швидкість обертання електрону.

Розв'язок:

При русі електрона по стійкій орбіті сила електричної взаємодії (Кулонівська) має бути рівною відцентровій силі:

$$F_e = m_e \frac{V^2}{R}$$

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_e^2}{R^2} = m_e \frac{V^2}{R}, \text{ звідки}$$

$$V = \frac{q_e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 R m_e}}$$

Підставляючи значення необхідних величин в SI

(R=0,53·10^{-10}м, q_e= 1,6·10^{-19} Кл, m_e=9,1·10^{-31} кг, ε_0=8,85·10^{-12} Ф/м),

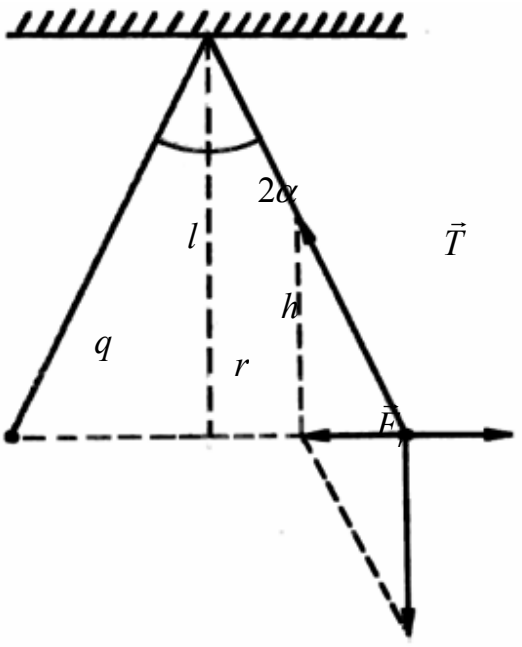
дістанемо:

$$V = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}}{\sqrt{4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}53 \cdot 10^{-10}}} = 2{,}18 \cdot 10^{6} \text{ (м/с)}$$

Задача № 1.2.

Дві мідні кульки діаметром d=10 мм на тонких нерозтяжних нитках підвішені так, що вони торкаються одна до одної. Після того, як кульки зарядили до величин q, відстань між ними стала рівною r=4 см. Визначити величину заряду q, якщо довжина нитки l=26 см.

Розв`язок:



Після надання кулькам електричних зарядів вони взаємодіють, і система переходить у новий стан рівноваги. За першим законом Ньютона стан рівноваги задовольняється умовою рівності нулю рівнодійної сили, тобто сума всіх сил, що діють на систему, дорівнює нулю:

$\vec{F}_e$ $$\vec{mg}+\vec{T}+\vec{F}_e=0$$

З малюнку видно, що рівнодійна сил $\vec{mg}$ і $\vec{T}$: $\vec{F}_n=\vec{T}+\vec{mg}$ зрівноважена силою mg електричної взаємодії $\vec{F}_e$, тобто $\vec{F}_e=-\vec{F}_n$ $F_e=F_n$.

З геометричних міркувань маємо:

$$mgtg\alpha=k\frac{q^2}{r^2}$$ Звідси

$$q=\sqrt{\frac{mgr^2}{k}tg\alpha}\,.$$

За умовою $m=\rho g\cdot\frac{1}{6}\pi d^3$, з малюнку $tg\alpha=\frac{r}{2h}$, де $h=\sqrt{l^2-\frac{r^2}{4}}$, отже

$$tg\alpha=\frac{r}{2\sqrt{l^2-\frac{r^2}{4}}}\,.$$

Тоді маємо $$q=2r^3\sqrt{\frac{2\pi\rho g}{3k\sqrt{l^2-\frac{r^2}{4}}}}\,.$$

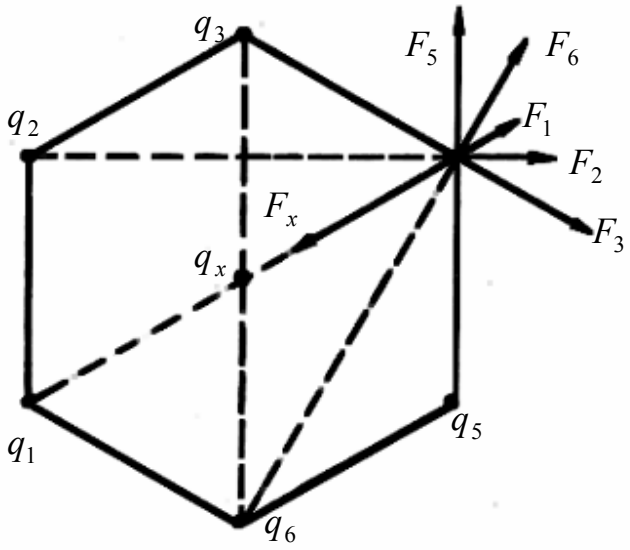
Підставляючи значення необхідних величин у SI, дістанемо

$$q=2\cdot64\cdot10^{-6}\sqrt{\frac{2\cdot3{,}14\cdot8{,}76\cdot10^3\cdot9{,}8}{3\cdot9\cdot10^9\sqrt{676\cdot10^{-4}-\frac{16\cdot10^{-4}}{4}}}}=1{,}21\cdot10^{-7}\,Кл$$

Задача № 1.3.

У вершинах правильного шестикутника знаходяться позитивні заряди **+*q***. Сторона шестикутника ***a***. Визначити величину заряду q_x, який необхідно вмістити у центр фігури для зрівноваження дії всіх шістьох зарядів **+*q***.

Розв`язок:



У результаті взаємодії усіх зарядів даної системи вона знаходиться в стані рівноваги, що означає, що сума всіх сил, які діють на кожний заряд, дорівнює нулю. Оберемо довільний заряд, наприклад q_4, і визначимо сили, які діють на нього. На основі принципу суперпозиції полів будемо мати

$$\vec{F}_1+\vec{F}_2+\vec{F}_3+\vec{F}_5+\vec{F}_6+\vec{F}_x=0$$

Виходячи з симетрії розташування зарядів можна зробити висновок, що $F_3=F_5$; $F_2=F_6$

Знайдемо послідовно їх суми:

$$\vec{F}'=\vec{F}_3+\vec{F}_5;\qquad F'=\sqrt{F_3^2+F_5^2+2F_3F_5\cos 120^0}=F_3$$

$$\vec{F}''=\vec{F}_6+\vec{F}_2;\qquad F''=\sqrt{F_6^2+F_2^2+2F_6F_2\cos 60^0}=F_2\sqrt{3}$$

$$F'''=F_3+\sqrt{3}F_2+F_1;\ \text{але}\ F_3=k\frac{q^2}{a^2};F_2=k\frac{q^2}{3a^2};F_1=k\frac{q^2}{4a^2};$$

$$\text{тому}\ F'''=k\frac{q^2}{a^2}+k\frac{q^2}{a^2}\frac{\sqrt{3}}{3}+k\frac{q^2}{4a^2}$$

$$\text{тоді}\ F'''=k\frac{q^2}{a^2}\left(\frac{15+4\sqrt{3}}{12}\right)$$

За умовою рівноваги $F_x=F'''$

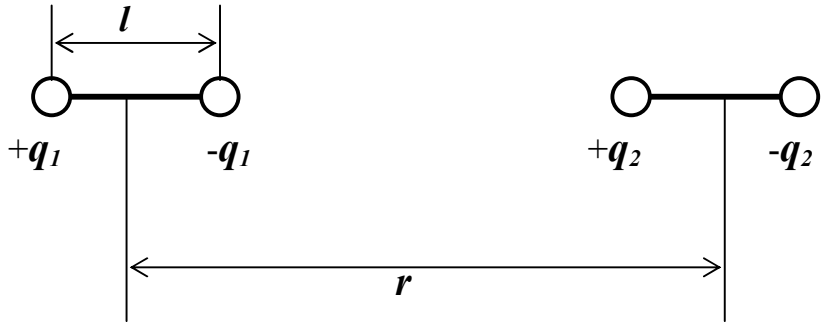
тобто $$k\frac{q_xq}{a^2}=k\frac{q^2}{a^2}\left(\frac{15+4\sqrt{3}}{12}\right)$$

або $$q_x=q\left(\frac{15+4\sqrt{3}}{12}\right);q_x=1{,}82q\ .$$

Задача № 1.4.

Визначити силу взаємодії двох молекул води, електричні моменти яких рівні ***p*** і розташовані вздовж однієї прямої. Відстань між молекулами ***r***.

Розв`язок:



Вважаючи кожну молекулу води диполем, слід зробити відповідний малюнок. Будемо вважати, що диполі зорієнтовані один відносно одного різноіменними зарядами. При ***r>>l*** напруженість поля в точці ***-q2*** дорівнює $\vec{E}_1 = \frac{\vec{P}}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l^3}$. При цьому ми нехтуємо відстанню ***l/2*** і вважаємо ***r*** як відстань від середини першого диполя до початку другого.

Тоді сила, що діє на заряд ***-q2*** дорівнює $\vec{F}_1 = -\frac{\vec{P}}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^3} q_2$.

А сила, що діє на заряд ***+q2***: $\vec{F}_2 = -\frac{\vec{P}}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 (r+l)^3} q_2$

Сумарна сила $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Оскільки вектори сил спрямовані вздовж однієї прямої, геометричну суму їх заміняємо на алгебраїчну.

$$F = -\frac{Pq_2}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^3} + \frac{Pq_2}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 (r+l)^3} = -\frac{Pq_2}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left[1 - \frac{1}{\left(1+\frac{l}{r}\right)^3}\right]$$

Враховуючи умову ***r>>l*** представимо другий член у дужках так

$$\frac{1}{\left(1+\frac{l}{r}\right)^3} \approx 1-3\frac{l}{r}.$$

тоді $$F = -\frac{3plq_2}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^4}.$$

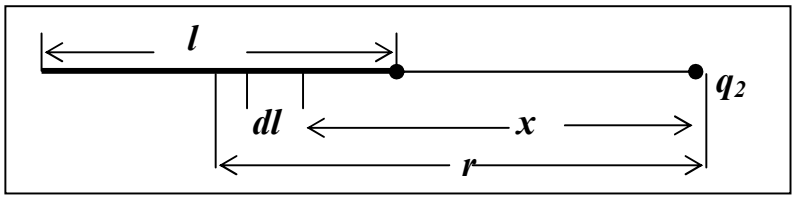
Добуток $lq_2=p_2$ - електричний момент другого диполя.

таким чином $$F = -\frac{3p^2}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^4}.$$

Задача № 1.5.

По тонкій нитці довжиною l = 8 см рівномірно розподілено заряд q_1=350мкКл, що діє з силою F=120 мкН на точковий заряд q_2, що знаходиться на продовженні тієї ж нитки на відстані r = 6 см від її середини. Визначити величину заряду q_2, якщо система знаходиться в повітрі.

Розв'язок:



Виберемо довільну дуже малу ділянку нитки dl, яка знаходиться на відстані x від заряду q_2. В межах цієї ділянки заряд будемо вважати точковим. Його величина $dq = \tau dl = \frac{q_1}{l} dl$. Цей заряд діятиме на заряд q_2 з силою

$dF = 1\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_2 dq}{x^2}$; Сумарну силу, з якою заряджена нитка діє на заряд q_2 визначимо як:

$$F = \int_{r-l/2}^{r+l/2}\frac{q_2\tau dx}{4\pi\varepsilon_0 x^2} = \frac{q_2\tau}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\int_{r-l/2}^{r+l/2}\frac{dx}{x^2} = \frac{q_2\tau}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{l}{(r^2-l^2/4)} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0(r^2-l^2/4)}$$ звідси

$$q_2 = \frac{\pi\varepsilon_0 F(4r^2-l^2)}{q_1}. \qquad q_2 = 7{,}62\cdot10^{-14}\ \text{Кл}.$$

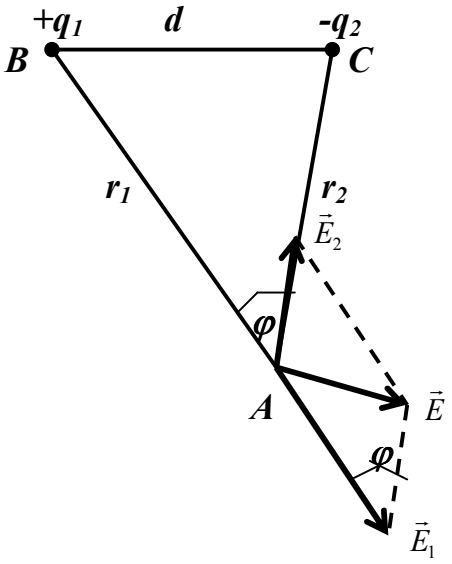
Практичне заняття № 2.

НАПРУЖЕНІСТЬ ПОЛЯ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦІЇ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 18.12 – 18.15, 18.17 – 18.21.
дома: [5] 3.13, 3.16, 3.17, 3.20 – 3.28.

Задача № 2.1.
Два точкових заряди $q_1 = 2\cdot10^{-7} Кл$ та $q_2 = -4\cdot10^{-7} Кл$ знаходяться в діелектрику з $\varepsilon = 2$ на відстані $d = 10 см$ один від одного. Визначити напруженість електричного поля в точці А, що знаходиться на відстані $r_1 = 20 см$ від першого та $r_2 = 15 см$ від другого зарядів.

Розв'язок:



Для розв'язку задачі скористаємося принципом суперпозиції:
$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, тут $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_2$ напруженості електричного поля, створені в точці А зарядами q_1 та q_2:

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1}{\varepsilon r_1^2}$$

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_2}{\varepsilon r_2^2}$$

Модуль напруженості електричного поля створеного обома зарядами обчислимо користуючись теоремою косинусів:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2\cos\varphi \quad (*)$$

Для обчислення cosφ застосуємо теорему косинусів до трикутника АВС:

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\varphi$$

$$\cos\varphi = \frac{r_1^2 + r_2^2 + d^2}{2r_1r_2}$$

Підставимо вирази E_1, E_2 і $\cos\varphi$ в (*) і отримаємо:

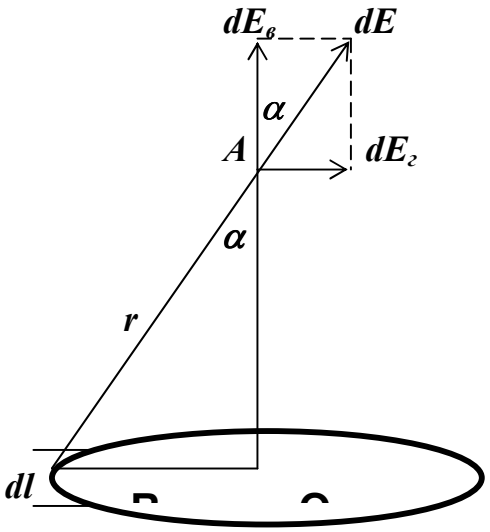
$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} - \frac{q_1q_2(r_1^2 + r_2^2 - d^2)}{r_1^3r_2^3}}$$

звідки $E = 6{,}2\cdot10^4$ *В/м.*

Задача № 2.2.

Тонке кільце радіусом ***R***=8*см* несе заряд, рівномірно розподілений з лінійною густиною ***τ=10^{-8}****Кл/м*. Знайти напруженість електричного поля в точці рівновіддаленій від всіх точок кільця на відстань ***r***=10*см*.

Розв'язок:



Виберемо на кільці довільну елементарну ділянку ***dl***, таку малу, що в межах її заряд можемо розглядати як точковий. Величина цього заряду буде ***dq=τdl***. Цей заряд створюватиме в точці А поле, напруженість якого: $dE=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{dq}{r^2}$ або $dE=\frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$. Розкладемо ***dE*** на дві складові: горизонтальну $dE_г$ паралельну до площини кільця та вертикальну $dE_в$, направлену вздовж перпендикуляра до площини кільця.

Входячи з того, що ділянка ***dl*** вибрана довільно і малюнок симетричний відносно осі ОА можна зробити висновок: для будь-якої ділянки ***dl*** завжди знайдеться точно така ж ділянка на іншому кінці діагоналі, горизонтальна складова вектора ***dE*** якої буде такою ж за величиною, але протилежною за напрямом. Отже, сума горизонтальних складових векторів $dE_г$ буде рівна "0", тобто $\int_0^l dE_г = 0$

Отже, результуюча напруженість поля буде дорівнювати сумі вертикальних складових:

$$E=\int_0^l dE_в=\int_0^l dE\cos\alpha=\int_0^l\frac{\tau\cos\alpha}{4\pi\varepsilon_0 r^2}dl \qquad \text{або} \qquad E=\frac{\tau\cos\alpha}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\int_0^l dl$$

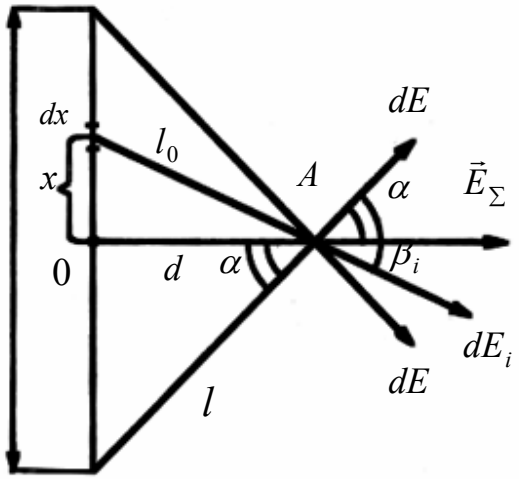
Врахуємо, що ***l=2πR***, а $\cos\alpha=\frac{\sqrt{r^2-R^2}}{r}$; отримаємо ***E= 27,1В/м.***

Задача № 2.3.

Тонка нитка рівномірно заряджена зарядом $q=6\cdot10^{-8}$*Кл*. Визначити напруженість поля в точці, яка міститься на відстані $d=5\cdot10^{-2}$*м* від центра нитки і на $l = 0{,}6$*м* від її кінців.

Розв`язок:

Зробивши малюнок, виділимо на відстані ***x*** від точки 0 по довжині нитки елемент ***dx***.



Заряд цього елемента $dq = \frac{q}{L}dx$.

Напруженість поля в точці *A* створена елементарним зарядом ***dq*** визначається, як напруженість точкового заряду.

$$dE_i = \frac{dq}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 l_0^2} = \frac{q\cdot dx}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 l_0^2 L}$$

Результуюча напруженість всіх елементарних зарядів dq_i дорівнює алгебраїчні сумі складових dE_i на напрямку *OA*.

$$E = \sum_{i=1}^{n} dE_i \cos\beta_i$$

Тобто $E = \int \frac{qdx}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 l_0^2 L}\cdot\cos\beta$.

Оскільки під інтегралом знаходиться декілька змінних, не залежних з першого погляду величин ***x, β, l_0*** , потрібно виразити їх через одну з них. Найкраще використати для цього кут ***β***.

$$\cos\beta = \frac{d}{l_0}; l_0 = \frac{d}{\cos\beta}; x = d\cdot tg\beta; dx = \frac{d\cdot d\beta}{\cos^2\beta}$$

Підставивши ці величини в попередній вираз, запишемо

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 L}\int \frac{d\cdot\cos\beta\cdot\cos^2\beta\cdot d\beta}{d^2\cos\beta}$$

Межі такого інтегралу визначаються кутами, між якими змінюється кут ***β***, тобто між кутами $-\alpha$ і $+\alpha$, це кути між крайніми значеннями елементарних напруженостей ***dE*** і їх проекцією на напрям рівнодійної *OA*.

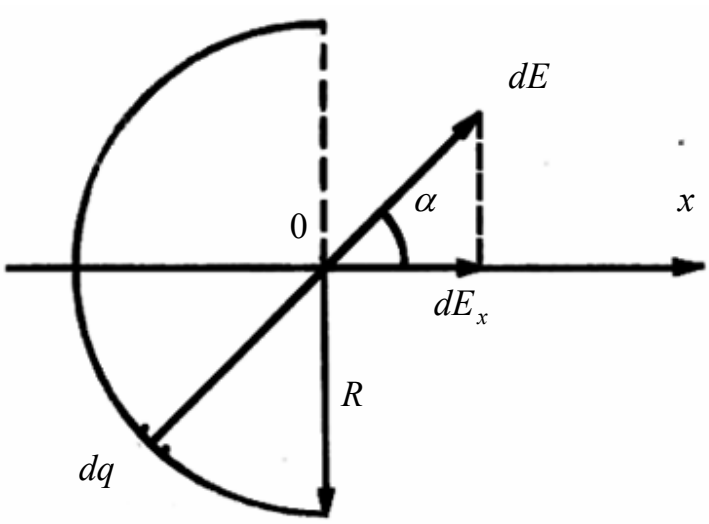
$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 Ld}\int_{-\alpha}^{\alpha}\cos\beta d\beta = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 Ld}(\sin\alpha + \sin\alpha); \sin\alpha = \frac{L}{2l}$$

Таким чином $E = \frac{2qL}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 Ld\,2l} = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 ld}$.

Підставивши значення, дістанемо $E \approx 2\cdot 10^4 \frac{B}{м}$.

Задача № 2.4.
Провідник у вигляді півкола радіусом ***R***=0,9*м* рівномірно заряджений зарядом ***q***=5*нКл*. Визначити напруженість поля у центрі цієї фігури.

Розв`язок:



Уважний аналіз умови приводить до висновку, що використати вираз для визначення напруженості поля точкового заряду неможливо, оскільки довжина провідника одного порядку з величиною радіуса; теорему Остроградського - Гауса використати важко, оскільки вона застосовується, як правило, до розрахунку симетричних полів. Тому логічно використати принцип суперпозиції полів, поділивши заряджений провідник на елементарні заряди ***dq***. Кожний такий заряд створює напруженість ***dE***. В точці ***O*** напруженість поля буде визначатись сумою горизонтальних складових dE_x. Вертикальні складові взаємно компенсуються. Тому знайдемо

$$dE_x = dE\cos\alpha = k\frac{dq}{R^2}\cos\alpha.$$

За умовою $dq = \frac{q}{\pi R}dl$. Тоді $dE_x = \frac{kq}{\pi R^3}\cos\alpha\cdot dl$.

З геометричних міркувань $\alpha = \frac{l}{R}$ і $dx = \frac{dl}{R}$.

Визначаючи з останнього виразу ***dl***, будемо мати

$$dE_x = \frac{kq}{\pi R^2}\cos\alpha \cdot d\alpha .$$

Остаточно, після інтегрування дістанемо

$$E = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{kq}{\pi R^2}\cos\alpha d\alpha = \frac{2kq}{\pi R^2};$$

$$E = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-9}}{3{,}14 \cdot 0{,}81} = 35{,}4\left(\frac{B}{M}\right)$$

Задача № 2.5.

Диск радіусом ***R***=0,2*м* заряджено рівномірно з поверхневою густиною $\sigma = 8{,}85 \cdot 10^{-7}\ Кл/м^2$. Визначити напруженість поля в точці на перпендикулярі, що проходить через центр диска, і розміщена на відстані ***h*** = 0,2*м* від нього.

Розв`язок:

Зробимо малюнок у відповідності до умови. Тут логічно представити заряджене кільце як сукупність точкових зарядів. Знайдемо напруженість від кожного такого заряду. Результуючий вектор напруженості електричного поля буде напрямлений вздовж перпендикуляра *OA*.

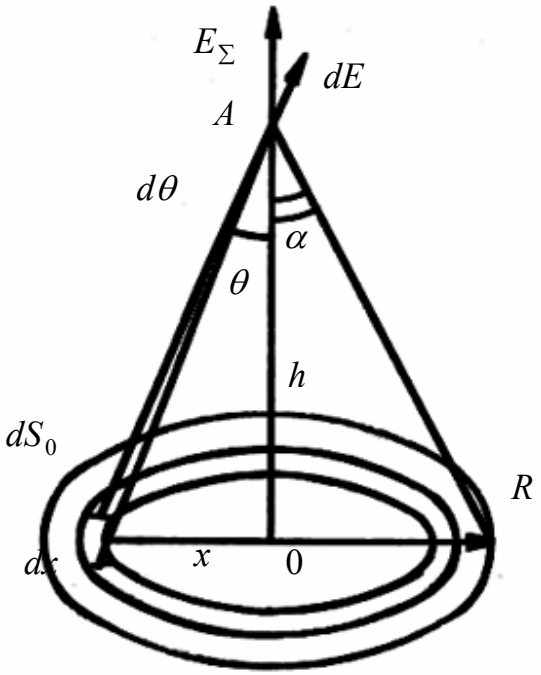
Виберемо елемент поверхні dS_0 на кільці, яке випишемо внутрішнім радіусом ***x*** з центра диска. Товщина кільця ***dx***.

Тоді елементарна напруженість поля в точці *A* створена елементом зарядженої площини dS_0 буде мати вигляд

$$dE = \frac{\sigma \cdot dS_0}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 l^2}$$

Визначимо ***l*** через відому ***h*** : $l = \frac{h}{\cos\theta}$.

Отже $dE = \frac{\sigma \cdot dS_0 \cos^2\theta}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 h^2}$.



Напруженість поля створена кільцем товщиною ***dx*** з внутрішнім радіусом ***x*** є геометричною сумою всіх елементарних напруженостей, які створені зарядами $\sigma \cdot dS_0$, або елементарним зарядом всього кільця $\sigma \cdot dS$.

Представимо dS як суму $\sum dS_0$. Дістанемо:

$$dS = \sum dS_0 = dx \cdot 2\pi x.$$

Тоді сумарна напруженість поля, що утворене кільцем, буде визначатись сумою проекцій елементарних напруженостей на напрям *OA*. Оскільки сумарна напруженість E_Σ складається з перпендикулярних складових *dE* (горизонтальні в сумі дорівнюють нулеві):

$$dE_{кільця} = \frac{\sigma \cdot \cos^2 \cdot dx \cdot 2\pi x}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 h^2} \cdot \cos\theta = \frac{2\pi\sigma \cdot \cos^3\theta}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 h^2} xdx = \frac{\sigma \cdot \cos^3\theta}{2\varepsilon\varepsilon_0 h^2} xdx.$$

Інтегруючи цей вираз в межах зміни ***x***, дістанемо

$$E = \int_0^R \frac{\sigma \cdot \cos^3\theta}{2\varepsilon\varepsilon_0 h^2} xdx$$

Проте, таке інтегрування має незручність, яка полягає у неявній залежності змінних параметрів від ***R***. Перейдемо до однієї змінної θ, яка змінюється в межах від 0 до α.

$$x = h \cdot tg\theta; dx = \frac{h}{\cos^2\theta}$$

Тоді:

$$E=\int_0^{\alpha}\frac{\sigma\cdot\cos^3\theta}{2\varepsilon\varepsilon_0 h^2}\cdot h\cdot tg\theta\cdot\frac{h}{\cos^2\theta}d\theta=\int_0^{\alpha}\frac{\sigma\cdot\cos^3\theta\cdot h^2\sin\theta}{2\varepsilon\varepsilon_0 h^2\cos\theta\cdot\cos^2\theta}d\theta=$$

$$=\int_0^{\alpha}\frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}\sin\theta\cdot d\theta=\frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}\int_0^{\alpha}\sin\theta\cdot d\theta=\frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}(1-\cos\alpha),\text{де}\quad .$$

$$\cos\alpha=\frac{h}{\sqrt{R^2+h^2}}$$

Остаточно $$E=\frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}\left[1-\frac{1}{\sqrt{1+\frac{R^2}{h^2}}}\right].$$

Для узагальнених висновків зауважимо:

1) якщо $h<<R$, то вираз напруженості набуває вигляду $E=\frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}\left(1-\frac{h}{R}\right)$,

При $\boldsymbol{h\to 0}$ дістанемо $E=\frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}$, що є виразом для напруженості поля площини.

2) При $h>>R$, оскільки $\frac{1}{\sqrt{1+\frac{R^2}{h^2}}}\approx 1-\frac{R^2}{2h^2}$, дістанемо $E=\frac{\sigma R^2}{4\varepsilon\varepsilon_0 h^2}$ або, домноживши чисельник і значення на $\boldsymbol{\pi}$, будемо мати $E=\frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 h^2}$, що переходить у формулу напруженості поля точкового заряду.

Підставивши дані умови задачі, обчислимо значення напруженості поля у точці А.

$$E=\frac{8{,}85\cdot10^{-7}}{2\cdot1\cdot8{,}85\cdot10^{-12}}\left[1-\frac{1}{\sqrt{1+\frac{(0{,}2)^2}{(0{,}2)^2}}}\right]=\frac{10^5}{2}\left[1-\frac{1}{\sqrt{2}}\right]=0{,}5\cdot10^5\cdot0{,}3=1{,}5\cdot10^4\ \frac{В}{м}$$

Практичне заняття № 3.

НАПРУЖЕНІСТЬ ПОЛЯ. ТЕОРЕМА ГАУССА.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії : [6] 18.27, 18.31, 18.32, 18.34, 18.35, 18.38, 18.40.
дома: [5] 3.43, 3.45, 3.47, 3.49, 3.51 - 3.57.

Задача № 3.1.
З якою силою F_s на одиницю площі відштовхується дві одноіменно заряджені нескінченні пластини розташовані паралельно у вакуумі. Поверхнево густина заряду на пластинах $\sigma = 0{,}3$мКл/м^2.

Розв'язок:

Заряд одиниці поверхні першої пластини розглядаємо в полі створеному другою пластиною

$$F=qE \quad \text{або} \quad F_s=(q\cdot E)/s.$$

Напруженість поля поблизу нескінченної рівномірно зарядженою пластини згідно до теореми Гаусса:

$$E=\sigma/2\varepsilon\varepsilon_0; \quad q/s=\sigma; \quad \varepsilon=1$$

Отже, $F_s=\sigma^2/2\varepsilon_0 \quad F_s=5{,}1\ кН/м^2.$

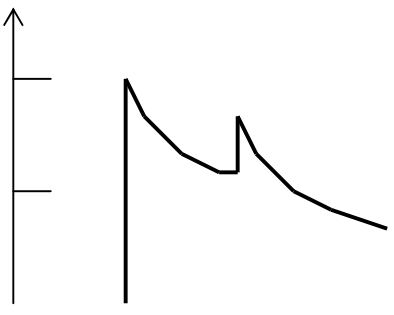
Задача № 3.2.
Дві довгі тонкостінні коаксіальні трубки радіусів R_1=2см та R_2=4см несуть заряди, рівномірно розподілені по довжині з лінійними густинами $\tau_1 = 10^{-3}$ мкКл/м та $\tau_2 = -5\cdot10^{-4}$ мкКл/м. Простір між трубками заповнено ізолятором з діелектричною проникністю ε=3. Визначити напруженість поля в точках, які знаходяться на відстані 1, 3 та 5см від спільної осі трубок. Намалювати схематично графік залежності напруженості поля від відстані до осі трубок.

Розв'язок:

1. Напруженість електричного поля в всередині трубок згідно до теореми Гаусса буде дорівнювати нулеві. $E_A=0$
2. Згідно до теореми Гаусса електричне поле між трубками створюватиметься лише внутрішнього трубкою. Його напруженість:

$$E_B=\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r}; \qquad R=0{,}03м; \quad \varepsilon=3, \quad E_B=200\ В/м$$

3. Електричне поле за межами кабелями буде створюватись обома



трубками: 200

$$E_C = E_1 + E_2 =$$

$$\frac{\tau_1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r} - \frac{\tau_2}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r} = \frac{\tau_1\tau_2}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r}.$$ 100

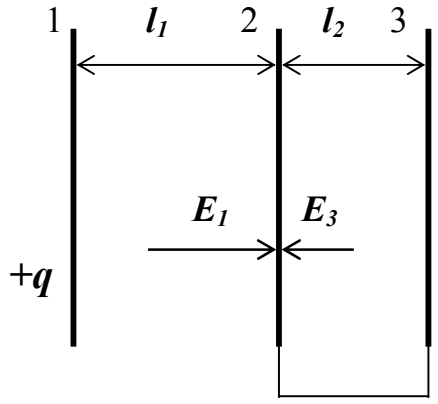
r =5, ε=1. E_C=180 В/м

1 3 5 ***r***, *см*

Задача № 3.3.

Три металеві пластини розташовані на відстані l_1 та l_2 одна від одної. На першій пластині знаходиться заряд $+q$. Дві незаряджені пластини закорочені між собою. Визначити силу, яка діє на другу пластину, якщо площі всіх пластин однакові та рівні S.

Розв`язок:



Розглянемо, які поля будуть існувати між пластинами. Очевидно, на пластинах 2 і 3 завдяки електростатичної індукції виникнуть заряди різних знаків, оскільки вони повинні утворити електронейтральну систему.

Тепер кожна пластина утворює власне електричне поле у всіх точках простору. Зрозуміло, що на пластину 2 будуть діяти поля $\vec{E}_1$ та $\vec{E}_3$. Тоді

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_1 + \vec{F}_3 \quad \text{або} \quad \vec{F}_2 = q_1\vec{E}_1 + q_1\vec{E}_3,$$

тут q_1 − заряд пластини 2, його треба визначити. Очевидно, для цього треба пов`язати q та q_1. Для цього скористаємось умовою відсутності поля між пластинами 2 і 3. $\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = 0$, або $E_1 = \frac{q}{2\varepsilon_0 S}; E_2 = E_3 = \frac{q_1}{2\varepsilon_0 S}$

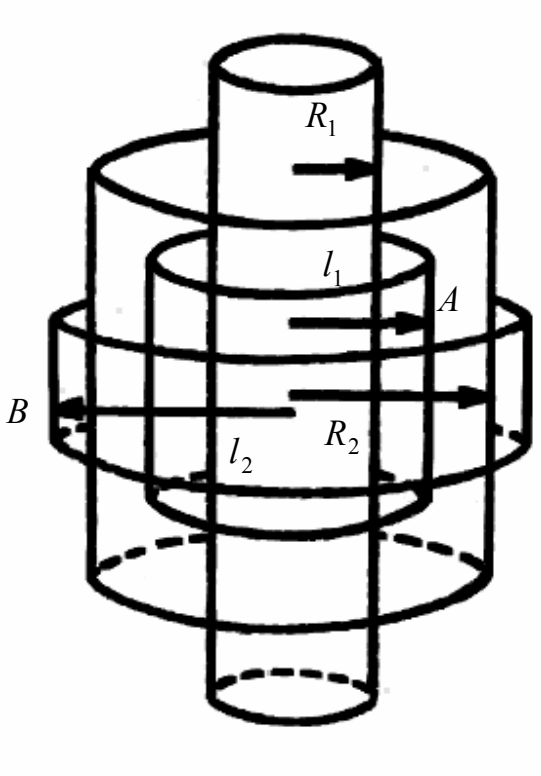
Враховуючи напрям полів, будемо мати

$$\frac{q}{2\varepsilon_0 S} - \frac{q_1}{2\varepsilon_0 S} - \frac{q_1}{2\varepsilon_0 S} = 0$$ Звідки $q_1 = \frac{1}{2}q$. Тепер $F_2 = \frac{q^2}{8\varepsilon_0 S}$.

Задача 3.4.

Визначити напруженість поля від двох нескінченних коаксіальних циліндрів в точках, що віддалені від осі на 10 і 20 мм, якщо радіус внутрішнього циліндра 9 мм, а зовнішнього 12 мм. Густина зарядів на поверхні внутрішнього циліндру $\sigma_1 = 2\times10^{-3}$ Кл/м^2 , зовнішнього $\sigma_2 = 4\times10^{-3}$ Кл/м^2.

Розв`язок:



Для розв`язку задачі необхідно зробити малюнок. Визначимо напруженість поля в точці, що лежить між поверхнями циліндрів на відстані l_1(точка **А**). Застосуємо теорему Остроградського–Гаусса до проведеної через цю точку допоміжної циліндричної поверхні. Потік вектора індукції через основи обраної поверхні висотою h дорівнює нулю, оскільки при умові $l_1 << h$ лінії індукції поля будуть паралельні до них.

Запишемо потік вектора індукції електростатичного поля через бічну поверхню обраної циліндричної поверхні

$$N_{D1} = \varepsilon\varepsilon_0 E_1 2\pi l_1 h$$

За теоремою Остроградського - Гаусса потік N_D дорівнює сумі зарядів, що охоплює дана поверхня, таким чином, це заряд, який припадає на поверхню довжиною h внутрішнього коаксіального циліндра: $q_1 = \sigma_1 2\pi R_1 h$. Отже:

$E_1 \varepsilon\varepsilon_0 2\pi l_1 h = \sigma_1 2\pi R_1 h$ звідки $E_1 = \dfrac{\sigma_1 R_1}{\varepsilon\varepsilon_0 l_1}$; $E_1 = \dfrac{2\cdot10^{-3}\times9\cdot10^{-3}}{8{,}85\cdot10^{-12}\times10^{-2}} = 2{,}03\cdot10^{8}\ \dfrac{В}{м}$

Аналогічно визначимо напруженість поля в точці **В** за межами циліндрів. Повний потік через поверхню циліндра радіусом l_2 і висотою h дорівнює:

$$N_{D2} = E_2 \varepsilon\varepsilon_0 E_1 2\pi l_2 h$$

Проте в цій точці поле створене сумарним зарядом двох поверхонь. Тому

$$q_2 = \sigma_1 2\pi R_1 h + \sigma_2 2\pi R_2 h = 2\pi h(\sigma_1 R_1 + \sigma_2 R_2)\,.$$

За теоремою Остроградського-Гауса у цьому випадку маємо :

$$\varepsilon\varepsilon_0 E_2 2\pi l_2 h = 2\pi h(\sigma_1 R_1 + \sigma_2 R_2)$$

Звідки

$$E_2 = \frac{\sigma_1 R_1 + \sigma_2 R_2}{\varepsilon\varepsilon_0 l_2}; \qquad E_2 \approx 3{,}73\times 10^8 \frac{B}{м}$$

Задача № 3.5.

Точковий заряд ***q***= 50нКл знаходиться на осі прямого колового циліндру на відстані 5см від основи. Знайти число силових ліній, які проходять через його бічну поверхню, якщо висота циліндру ***h***=10см, а радіус основи ***r***=5см.

Розв'язок:

Число силових ліній дорівнює потоку вектора напруженості. Для розв'язку задачі побудуємо навколо циліндру сферу радіуса $R=\sqrt{r^2}+(\frac{h}{2})^2$. Потік вектора напруженості через цю сферу $N = E \cdot S = E \cdot 4\pi RH$ (*) дорівнює потокові через весь циліндр (бокова поверхня + дві основи). Через одну з основ буде проходити такий же потік як і через об'ємний сегмент вирізаний в сфері радіуса ***R*** циліндром:

$$N_{осн}=E \cdot S_{об'єм.сегм.}=E \cdot 2\pi RH \ (*),$$

тут $2\pi RH$- площа об'ємного циліндру $H=R-h/2$.

У виразах помічених ***(*)*** значення ***E*** однакове $E=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R^2}$.

Розділимо перший з цих виразів на другий: $N/N_{осн}=2R/H$

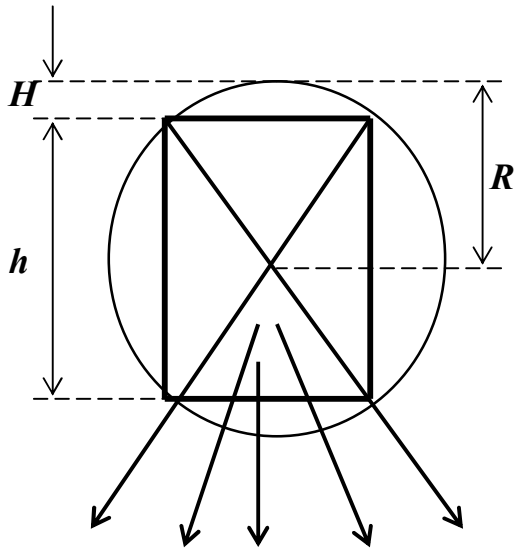
Через бічну поверхню циліндра буде проходити частина сумарного потоку рівна:

$N_б=N-2N_{осн}$; $N_б=N(1-2N_{осн}/N)$

Згідно теореми Гаусса сумарний потік вектора напруженості:

$N=q/\varepsilon\varepsilon_0$,

отже: $N_б=q/\varepsilon\varepsilon_0(1-2H/2R)=q/\varepsilon\varepsilon_0(1-H/R)$;



$H = R - h/2; \quad R = \sqrt{r^2 + (\frac{h}{2})^2}$

$N = q/\varepsilon\varepsilon_0 (1 - \sqrt{r^2 + (\frac{h}{2})^2} - h/2)$

Відповідь: $N_б = 4$ кВ·м.

Практичне заняття № 4.

ПОТЕНЦІАЛ ПОЛЯ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 18.42, 18.45, 18.47 - 18.51, 18.54, 18.57, 18.59, 18.60.
дома: [5] 3.60, 3.63, 3.68 - 3.74, 3.82.

Задача № 4.1. До якої відстані можуть наблизитись два електрони, які рухаються назустріч один одному з відносною швидкістю $v_0 = 10^6$ *м/с*?

Розв'язок:

Зв'яжемо систему відліку з одним з електронів. Тоді інший буде наближатись до нього зі швидкістю $v_0 = 10^6$ *м/с*. Коли другий електрон увійде у поле першого, його енергія буде рівною $W = \frac{m_e v_0^2}{2}$; Рухаючись у полі першого електрону другий буде витрачати свою енергію на подолання сил поля і зупиниться коли її повністю втратить: $W = 0$; $v_1 = 0$. Отже енергія $W = \frac{m_e v_0^2}{2}$ буде витрачена на роботу проти сил поля $A = q_e(\varphi_0 - \varphi_1)$. Тут φ_1 – потенціал поля створеного першим електроном в точці, де швидкість другого стане рівною нулеві; φ_0 – потенціал поля нескінченності $\varphi_0 = 0$ (тобто там де не відчувається дія одного електрона на другий).

$A = \Delta W; \quad A = q_e(\varphi_0 - \varphi_1); \quad \Delta W = \frac{m_e v_1^2}{2} - \frac{m_e v_0^2}{2}$;

Врахуємо що: $\frac{m_e v_1^2}{2} = 0$ і $\varphi_0 = 0$, отже: $q_e\varphi_1 = \frac{m_e v_0^2}{2}$

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_e^{\,2}}{r_X};\quad \text{звідки}\quad r_X = \frac{2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_e^{\,2}}{m_e v_0^2};$$

$$\left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\cdot10^9 \text{м/Ф};\ \boldsymbol{q_e} = -1{,}6\cdot10^{-19}\text{Кл};\ \boldsymbol{m_e} = 9{,}1\cdot10^{-31}\text{кг};\ \boldsymbol{v_0} = 10^6\ \text{м/с}\right)$$

$$\boldsymbol{r_X} = 5{,}1\cdot10^{-10}\text{м}$$

Задача № 4.2. Поле створено електричним зарядом, рівномірно розподіленим по довгому циліндру радіусом $\boldsymbol{R}$ = 1*см* з лінійною густиною заряду $\boldsymbol{\tau}$ = 20*нКл/м*. Визначити різницю потенціалів двох точок цього поля, що знаходяться на відстанях $\boldsymbol{a_1}$ =0,5*см* та $\boldsymbol{a_2}$ =2*см* від поверхні циліндру в середній його частині.

Розв'язок:

Напруженість поля поблизу середньої частини довгого зарядженого циліндру згідно теореми Остроградського - Гаусса: $E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}$

Напруженість зв'язана з різницею потенціалів:

$$\boldsymbol{E = -\,q\mathrm{rad}\,\varphi} \quad \text{або}\ \boldsymbol{E = -\,d\varphi/dr}\ \text{ звідки }\ \boldsymbol{d\varphi = -\,Edr = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}dr}$$

Різницю потенціалів між точками $\boldsymbol{a_1}$ і $\boldsymbol{a_2}$ визначимо інтегруючи останній вираз:

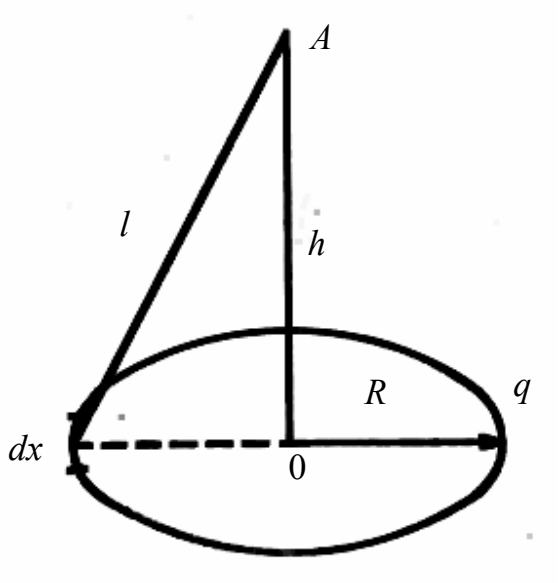
$$\boldsymbol{\varphi_1 - \varphi_2} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}\boldsymbol{dr} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_2}{r_1};$$

$\boldsymbol{r_2 = R + a_2}$ = 3(см); $\boldsymbol{r_1 = R + a_1}$=1,5(см) і $\boldsymbol{\varphi_1 - \varphi_2 = 200}$*В*.

Задача № 4.3.

Кільце тонкого дроту рівномірно заряджене зарядом $\boldsymbol{q}$ = 2·10^{-8}Кл. Радіус кільця $\boldsymbol{R}$ = 3 см. Визначити потенціал поля на перпендикулярі до площини кільця на відстані $\boldsymbol{h}$ = 4 см від неї та в центрі кільця.

Розв'язок:



Навколо зарядженого кільця існує електростатичне поле, і, оскільки потенціал поля в кожній точці є функцією координат цієї точки, то кожна точка має свій потенціал.

Обчислимо потенціал поля в точці А. Поле, що утворене зарядженим кільцем, можна розглядати як наслідок накладання полів окремих елементарних зарядів. При цій умові кільце можна розбити на малі відрізки dx, в межах яких заряд вважаємо точковим.

Кільце виготовлене з провідника і заряджене рівномірно з лінійною густиною заряду $\tau = \frac{q}{2\pi R}$. Елемент dx має елементарний заряд $dq = \tau dx$. Потенціал поля в точці А, який створений цим зарядом, дорівнює:

$$d\varphi = \frac{dq}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 l} = \frac{\tau dx}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 l} = \frac{qdx}{8\pi^2\varepsilon\varepsilon_0 lR}$$

Враховуючи принцип незалежності полів, для потенціалу в точці А дістанемо:

$$\varphi = \frac{q}{8\pi^2\varepsilon\varepsilon_0 lR}\int_0^{2\pi R} dx$$

Після інтегрування маємо $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}$,

З малюнку $l = \sqrt{R^2 + h^2}$

тоді $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0\sqrt{R^2 + h^2}}$.

Підставимо значення і визначимо φ_0 при h=0 , та φ_A

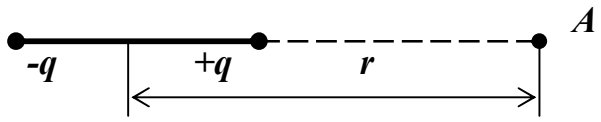
$$\varphi_0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R} = 9\cdot 10^9 \frac{2\cdot 10^{-8}}{3\cdot 10^{-2}} = 6\cdot 10^3 (B)$$

$$\varphi_A = 9\cdot 10^9 \frac{2\cdot 10^{-8}}{5\cdot 10^{-2}} = 3600(B)$$

Задача № 4.4.
Визначити потенціал поля в точці осі диполя на відстані ***r*** від центра диполя, якщо електричний момент його дорівнює ***p***, а плече - ***l***.

Розв'язок:

Потенціал поля в точці А дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів точкових зарядів -q і ***+q*** .



$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0\left(r-\frac{l}{2}\right)} - \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0\left(r+\frac{l}{2}\right)} = \frac{q-\frac{l}{2}}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r\left(1-\frac{l^2}{4r^2}\right)} =$$

$$= \frac{ql}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2\left(4-\frac{l^2}{r^2}\right)\cdot\frac{1}{4}} = \frac{p}{\pi\varepsilon\varepsilon_0\left(4-\frac{l^2}{r^2}\right)r^2};$$

$$\varphi = 2{,}3\times 10^3\,(B)$$

Задачу можна розв'язати, користуючись поняттям градієнта потенціалу

$$d\varphi = -E_l dl; \qquad \varphi = -\int E_l dl \qquad (l \to r)$$

Підставимо значення напруженості поля в точці, що розміщена на осі диполя на відстані ***r*** від його центра.

$$\varphi = -\int_r^\infty \frac{8prdr}{\pi\varepsilon\varepsilon_0\left(4r^2-l^2\right)} = \frac{p}{\pi\varepsilon\varepsilon_0\left(4-\frac{l^2}{r^2}\right)r^2}.$$

Задача № 4.5.
Дві металеві кульки радіусами R_1*=8см* та R_2*=18см* зарядили одноіменними зарядами q_1*=13нКл* та q_2*=18нКл* відповідно. Знайти величину зарядів кульок після їх з'єднання.

Розв'язок:

Згідно до закону збереження електричного заряду сумарний заряд кульок після з'єднання дорівнюватиме їх сумарному заряду до з'єднання. Тобто:

$$q_1' + q_2' = q_1 + q_2 = q = 31 \text{ нКл}. \quad (*)$$

Після з'єднання стануть рівними потенціали кульок:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad \text{або} \quad \frac{q'_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1} = \frac{q'_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2} \quad (**)$$

Рівняння (*) та (**) складають систему рівнянь з двома невідомими, розв'язавши яку отримаємо шуканий розподіл зарядів на кульках.

Скоротимо (**) на $4\pi\varepsilon_0$: $\frac{q'_1}{R_1} = \frac{q'_2}{R_2}$ або $R_2 q'_1 = R_1 q'_2$; $R_2(q - q'_2) = R_1 q'_2$

$558 - 18\,q'_2 = 8\,q'_2$ звідки: $q'_2 = 9{,}5$ *нКл*; $q'_1 = 21{,}5$ *нКл*.

Практичне заняття № 5.

ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ. КОНДЕНСАТОРИ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку

в аудиторії: [6] 19.1, 19.4, 19.5, 19.7, 19.9 – 19.11.

дома: [5] 3.95 – 3.105.

Задача 5.1.

Плоский конденсатор заповнений трьома шарами діелектриків: склом товщиною $d_1 = 0{,}35$ см $(\varepsilon_1 = 7)$, парафіном з $d_2 = 0{,}21$ см $(\varepsilon_2 = 2{,}1)$ і фабором $d_3 = 0{,}9$ см $(\varepsilon_3 = 4{,}5)$. Визначити напруженість поля в кожному діелектрику 10 кВ.

Розв'язок:

Позначимо напруженість поля і різницю потенціалів у відповідних шарах діелектрика: $\vec{E}_1;\ \vec{E}_2; \vec{E}_3$ і $U_1;\ U_2; U_3$.

Різниця потенціалів, що прикладена до пластин конденсатора:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = E_1 d_1 + E_2 d_2 + E_3 d_3 .$$

Оскільки індукція поля в будь-якому шарі діелектрика однакова:

$$D = \varepsilon_1\varepsilon_0 E_1 = \varepsilon_2\varepsilon_0 E_2 = \varepsilon_3\varepsilon_0 E_3 ,$$

виразимо E_2 і E_3 через E_1

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_1; E_3 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} E_1 .$$

Визначимо E_1:

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} d_3}; E_1 \approx 4{,}1 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}},$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 . U}{\varepsilon_2 \left(d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} d_3 \right)}; E_2 \approx 13{,}5 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}},$$

$$E_3 = \frac{\varepsilon_1 . U}{\varepsilon_3 \left(d_1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} d_3 \right)}; E_3 \approx 6{,}3 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Задача № 5.2.

Визначити електричну ємність плоского конденсатора з двома шарами діелектриків: фарфору ($\boldsymbol{d_1}$ = 2*мм*, $\boldsymbol{\varepsilon_1}$ = 6) та ебоніту ($\boldsymbol{d_2}$ = 1,5*мм*, $\boldsymbol{\varepsilon_2}$ = 2,6). Площа пластин конденсатора $\boldsymbol{S}$ = 100$см^2$.

Розв'язок:

Ємність конденсатора $C = \frac{q}{U}$, при цьому $\boldsymbol{U = U_1 + U_2 = E_1 d_1 + E_2 d_2}$.

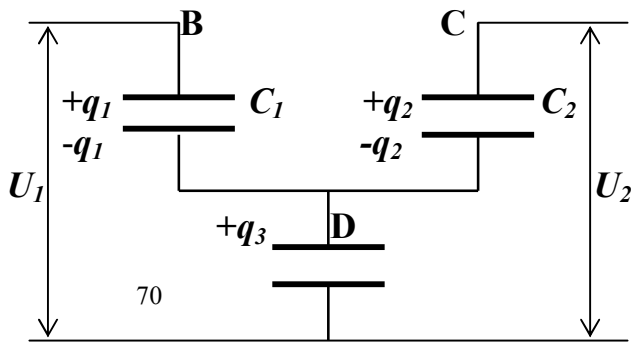
Враховуючи, що заряд $\boldsymbol{q = \sigma S}$ ($\boldsymbol{\sigma}$ - густина заряду), а напруженість поля між пластинами плоского конденсатора згідно теореми Остроградського - Гаусса $E = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0}$ будемо мати:

$$C = \frac{\sigma S}{\frac{\sigma}{\varepsilon_1 \varepsilon_0} d_1 + \frac{\sigma}{\varepsilon_2 \varepsilon_0} d_2} \text{ звідки } \quad C = \frac{\varepsilon_0 S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}}$$

C = 98,3пФ

Задача № 5.3.

Три конденсатори однакової ємності з'єднали, як показано на схемі. Чому дорівнює різниця потенціалів $\boldsymbol{U_{AD}}$ між тачками $\boldsymbol{A}$ та $\boldsymbol{D}$, якщо
$\boldsymbol{U_1}$ = 10$\boldsymbol{B}$
$\boldsymbol{U_2}$ = 20$\boldsymbol{B}$.



$-q_3$ C_3

A

Розв'язок:

Різниці потенціалів між точками D і B, D і C, A і D можуть бути розраховані виходячи з означення ємності:

$$U_{DB} = q_1/C_1 \quad U_{DC} = q_2/C_2 \quad U_{AD} = q_3/C_3$$

$$U_1 = U_{AB} = U_{AD} + U_{DB} \qquad U_2 = U_{AC} = U_{AD} + U_{DC}$$

Враховуючи, що ємності всіх конденсаторів однакові і що сума зарядів, що підходять до точки **D** дорівнює нулеві, отримаємо:

$$-q_1 - q_2 + q_3 = 0 \ (*)$$

$$q_1/C + q_3/C = U_1 \quad \text{звідки} \quad q_1 = U_1C - q_3$$
$$q_2/C + q_3/C = U_2 \quad \text{звідки} \quad q_2 = U_2C - q_3$$

Якщо підставити два останніх результати до виразу (∗) отримаємо:

$$-U_1C + q_3 - U_2C + q_3 + q_3 = 0 \text{ звідки}$$
$$3q_3 = (U_1 + U_2)/C$$
тоді
$$U_{AD} = q_3/C = (U_1 + U_2)/3 \qquad U_{AD} = 10B.$$

Задача № 5.4.

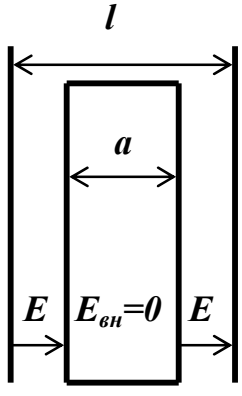
Між пластинами плоского конденсатора паралельно до них введена металева пластинка товщиною a = 8,0$мм$. Визначити ємність конденсатора, якщо площа кожної з пластини S = 100$см^2$, а відстань між ними l = 10,0$мм$.

Розв'язок:

Ємність конденсатора визначимо як $C = q/U$ $(*)$. Внаслідок явища електростатичної індукції вільні заряди в металевій пластинці перерозподіляться так, що напруженість поля всередині пластинки буде рівною $E_{вн} = 0$. Напруженість поля в просторі поза пластинкою E буде рівною:

$$E = \sigma/\varepsilon_0 = q/\varepsilon_0 S$$

- тут σ - поверхнева густина зарядів;



Різниця потенціалів між пластинами конденсатора: + - + -

$U = E\,(l - a) = q(l - a)/\varepsilon_0 S$

Підставивши отримане значення різниці потенціалів у вираз ***(*)*** отримаємо:

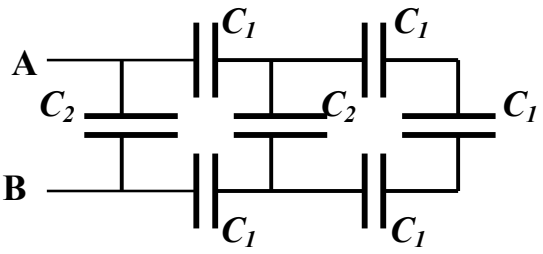
$$C = \varepsilon_0 S/(l - a)$$
$$C = 4{,}4 \cdot 10^{-11}\ Ф = 44\ пФ$$

Практичне заняття № 6.

З'ЄДНАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 19.14, 19.15, 19.20, 19.21, 19.25.
дома: [5] 3.106 – 3.118.

Задача 6.1.
Обчислити загальну ємність системи конденсаторів ємністю C_1 та C_2.

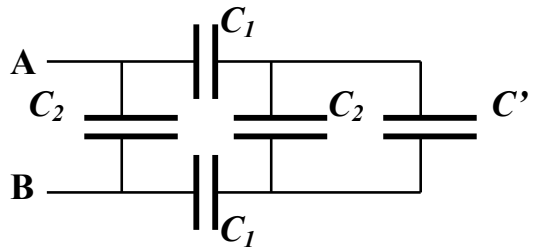


Розв'язок:

Замінимо схему еквівалентною, в якій три останніх з'єднаних послідовно конденсатори C_1 замінимо еквівалентним конденсатором C', ємність якого визначимо за формулою:

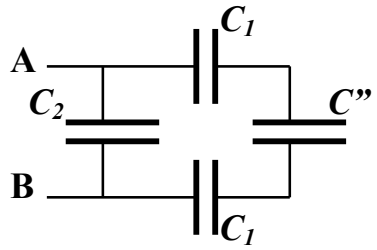
$$1/C' = 1/C_1 + 1/C_1 + 1/C_1$$

тобто $C' = C_1/3$

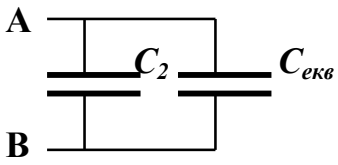


Наступним кроком замінимо конденсатори C' та C_2, з'єднані, як видно зі схеми паралельно, конденсатором C'', ємність якого:

$C'' = C' + C_2 = C_1/3 + C_2 = 1/3(C_1+3C_2)$



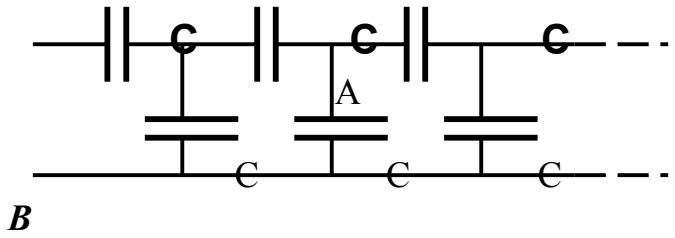
В останній спрощеній схемі два конденсатори C_1 та конденсатор C'' з'єднані послідовно. Замінимо їх еквівалентним $C_{екв}$, ємність якого обчислимо за формулою $1/C_{екв} = 1/C_1 + 1/C'' + 1/C_1$. звідки $C_{екв} = C_1(C_1 + 3C_2)/(5C_1+6C_2)$
Таким чином схема набуде кінцевого спрощеного вигляду:



Це паралельне з'єднання конденсаторів $C_{екв}$ та C_2, ємність яких дорівнює $C_x = C_2 + C_{екв}$

$$C_x = (8C_1C_2 + 6C_2^2 + C_1^2)/(5C_1 + 6C_2)$$

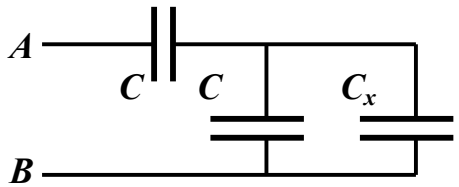
Задача 6.2.
Обчислити ємність нескінченного ланцюга, що складається з однакових конденсаторів ємністю C.



Розв'язок:

Так як ланцюг нескінченний то всі його елементи починаючи з другого можуть бути замінені ємністю C_x, рівною шуканій.

Схема набуде вигляду:



Крайні два конденсатори можна замінити конденсатором C_1, ємність якого: $C_1 = C_x + C$, тоді ємність C_x

$$\frac{1}{C_x} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_x + C}$$

$$C(C + C_x) = C_x(2C + C_x)$$

$$C_x^2 + CC_x - C^2 = 0$$

$$C_x = \frac{-C \pm \sqrt{C^2 + 4C^2}}{2} \qquad C_x = \frac{C(\sqrt{5} - 1)}{2}$$

Задача 6.3.
Обчислити ємність системи однакових конденсаторів ємністю C між точками A та B, зображених на схемі 1 та схемі 2.

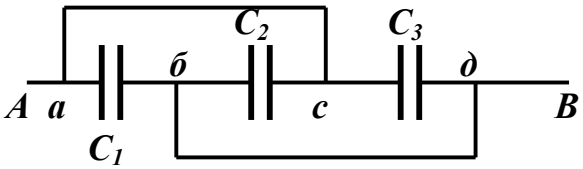
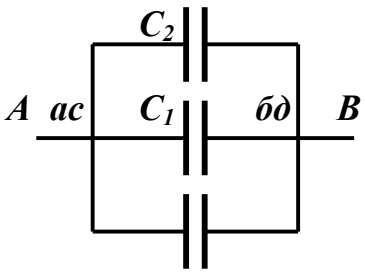


Схема 1

Розв'язок:

Спочатку розглянемо схему 1. Як видно з малюнку, точки a і c та $б$ і $д$ з'єднані між собою попарно (тобто – закорочені). Це дає можливість при спрощенні схеми розглядати ці точки (a-c та $б$-$д$) як суміщені. Тоді схема 1



набуде вигляду: Це паралельне з'єднання 3-х конденсаторів. Ємність такої схеми:

$$C_{екв} = C + C + C = 3C$$

C_3

$$C_{екв} = 3C$$

Тепер розглянемо схему 2.:

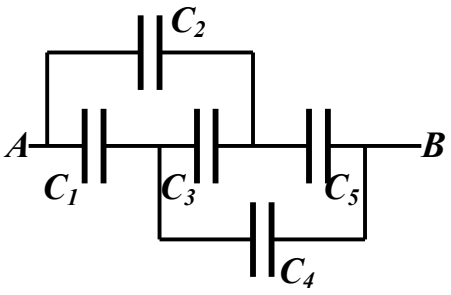
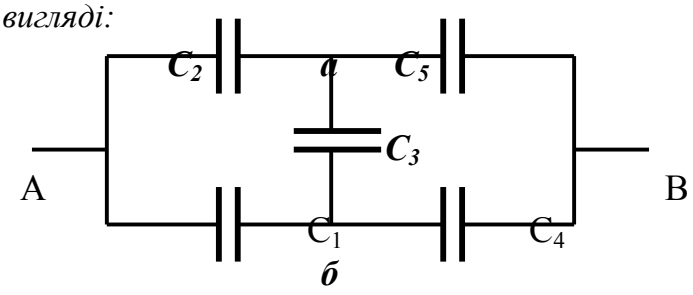


Схема 2

Схему 2 можна без спотворення зобразити у вигляді:

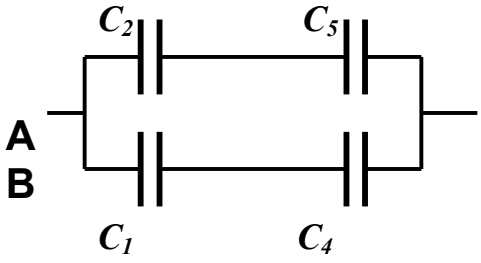


б

Так як всі конденсатори однакової ємності:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C$$

то потенціали точок ***а*** і ***б*** будуть однаковими, і конденсатор C_3 можна не враховувати. Таким чином схема буде представляти собою паралельне з'єднання верхньої та нижньої ділянок, які в свою чергу є послідовними з'єднаннями конденсаторів C_2 і C_5 та C_1 і C_4 :



Обчислимо ємність верхньої C_B та нижньої C_H ділянок:

$$\frac{1}{C_B} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} = \frac{2}{C} \qquad \frac{1}{C_H} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{2}{C}$$

$$C_B = C_H = C/2$$

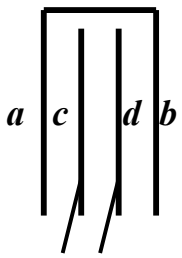
Еквівалентна ємність такої схеми:

$$C_{екв} = C_H + C_B = C/2 + C/2 = C$$

$$C_{екв} = C$$

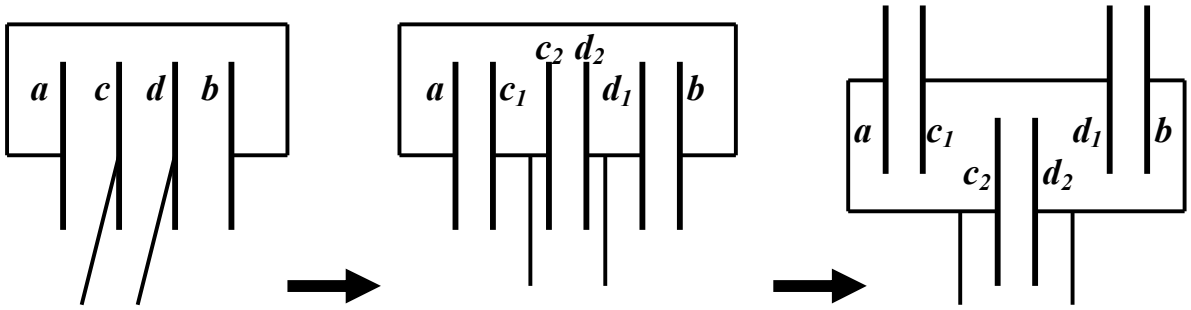
Задача 6.4.

Як зміниться ємність плоского конденсатора, якщо його вмістити в металеву коробку, стінки якої віддалені від пластин на відстань рівну відстані між ними. Краєвим ефектом нехтуємо.



Розв'язок:

Нехай ємність конденсатора *C*. Замінимо дані схему схемою, що складається з трьох конденсаторів. Врахуємо, що кожна з пластин *c* і *d* є одночасно обкладкою двох конденсаторів



За умовою задачі відстані між пластинами однакові і розміри пластин однакові. Отже і ємності їх будуть однаковими. Конденсатори з пластинами ac_1 і d_1b з'єднані послідовно і їх сумарна ємність C_1 обчислюється як:

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{2}{C} \qquad C_1 = \frac{C}{2}$$

До цих конденсаторів паралельно приєднаний конденсатор з пластинами c_2d_2. Ємність такої системи буде рівною $C_X = C + C_1 = \frac{3C}{2}$. Отже, якщо конденсатор вмістити в металеву коробку, його ємність зросте в 1,5 рази.

Задача 6.5.

Конденсатор $C_1 = 20мкФ$ зарядили до різниці потенціалів $U_1 = 40В$, а конденсатор $C_2 = 12мкФ$ зарядили до різниці потенціалів $U_1 = 12В$. Після відключення їх з'єднали різноіменними обкладками. Чому стала рівною різниця потенціалів, яка установилась на конденсаторах після з'єднання?

Розв'язок:

до з'єднання *після з'єднання*

Обчислимо заряди на першому і другому конденсаторах:

$$q_1 = U_1C_1 \qquad q_2 = U_2C_2$$

Після з'єднання на обох конденсаторах будуть однакові заряди: $q = q_1 - q_2$

Сумарна ємність після з'єднання $C = C_1 + C_2$. Отже: $U = \frac{q}{C} = \frac{U_1C_1 - U_2C_2}{C_1 + C_2}$

$$U = 20{,}5В$$

Практичне заняття № 7.

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ В ДІЕЛЕКТРИКАХ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 20.4 – 20.14.
дома: [5] 3.119, 3.122 – 3.131.

Задача № 7.1.

Між пластинами плоского конденсатора знаходиться скляна пластина ($\varepsilon = 7$), що торкається його пластин. Конденсатор зарядили до різниці потенціалів U=100B. Якою буде різниця потенціалів, якщо витягти пластину з конденсатора?

Розв'язок:

Якщо витягнути скляну пластинку з відімкнутого від джерела конденсатора ємність і різниця потенціалів зміняться, а величина зарядів на пластинах залишиться сталою: $q = \text{const}$; $q_1 = q_2$

.

$$q_1 = C_1U_1 ; \quad q_2 = C_2U_2 ; \quad C_1 = \varepsilon C_2 ;$$

Звідки: $$U_2 = \varepsilon U_1 ; \quad U_2 = 700B.$$

Задача № 7.2.

До повітряного конденсатора, зарядженого до різниці потенціалів U = 600B і відключеного від джерела, при'єднали другий незаряджений конденсатор таких же розмірів та форми але з діелектриком. Визначити діелектричну проникність цього діелектрика, якщо після приєднання другого конденсатора різниця потенціалів на першому зменшилась до U_1 = 100B.

Розв'язок:

Заряд першого конденсатора після приєднання другого розподілився між цими двома конденсаторами:

$$q = q_1 + q_2 ;$$

Цей розподіл зарядів приводить до того, що на обох конденсаторах встановлюється однакова різниця потенціалів U_1 **=** ***100*****В. Таким чином:**

$$C_1U = C_1U_1 + C_2U_1$$

Тут C_1 ***і*** C_2 ***– ємності першого та другого конденсаторів. Так як їх розміри однакові, то:*** $C_2 = \varepsilon C_1$ ***. Отже:***

$$C_1U = C_1U_1 + \varepsilon C_1U_1$$

$$\boldsymbol{C_1U = C_1U_1 (1 + \varepsilon)}$$

$$\boldsymbol{U/U_1 = (1 + \varepsilon)}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon = U/U_1 - 1} = \ 600/100 - 1 = 5$$

Задача № 7.3.

Простір між пластинами конденсатора, відстань між якими дорівнює 4 мм, заповнений слюдою ($\varepsilon = 6$). До пластин прикладена різниця потенціалів 1200*В*. Визначити: 1) напруженість поля в діелектрику - ***E***; 2) поверхневу густину вільних зарядів (зарядів на пластинах конденсатора) - $\boldsymbol{\sigma_0}$; 3) поверхневу густину зв'язаних зарядів (зарядів на поверхні діелектрика) - $\boldsymbol{\sigma'}$; 4) діелектричну сприйнятливість слюди - $\boldsymbol{\alpha}$.

Розв'язок:

1. Напруженість електростатичного поля в діелектрику відповідає напруженості електростатичного поля конденсатора і визначається різницею потенціалів між пластинами конденсатора:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d}; E = 3 \cdot 10^5 \ \frac{\text{В}}{\text{м}} \qquad (1).$$

2. Напруженість поля створеного в вакуумі вільними зарядами: $E_0 = \dfrac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$

Зв'язані заряди створюють поле напруженістю: $E' = \dfrac{\sigma'}{\varepsilon_0}$.

Результуюче поле в діелектрику: $E = E_0 - E'$ або $\boxed{E = \dfrac{\sigma_0 - \sigma'}{\varepsilon_0}}$ (*)

Згадаємо означення діелектричної проникності:

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F} = \frac{E_0}{E}, \quad \text{отже} \quad E = \frac{E_0}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon\varepsilon_0} \qquad (2)$$

З виразів (1) та (2) обчислимо поверхневу густину вільних зарядів - $\boldsymbol{\sigma_0}$:

$$E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{U}{d}; \qquad \sigma_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U}{d} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-5} \frac{Кл}{м^2}.$$

3. Якщо вираз (2) підставимо в (*) отримаємо зв'язок між поверхневими густинами вільних та зв'язаних зарядів: $\frac{\sigma_0}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0 - \sigma'}{\varepsilon_0}$;

$$\sigma' == \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\sigma_0$$

Це дає можливість обчислити поверхневу густину зв'язаних зарядів - σ' :

$$\sigma' = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)\frac{U}{d}; \qquad \sigma' = 1{,}33 \cdot 10^{-5} \frac{Кл}{м^2}.$$

4. Діелектрична проникність та діелектрична сприйнятливість зв'язані між собою співвідношенням:

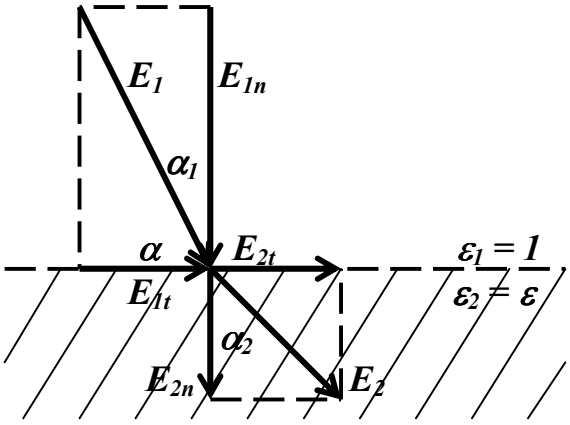
$$\varepsilon = 1 + \alpha$$

Отже: $\alpha = \varepsilon - 1$ $\alpha = 6 - 1 = 5$

Задача 7.4.

Вектор напруженості електричного поля в повітрі утворює з поверхнею діелектрика (ε = 7) кут α=60^0. Визначити: 1) кут між напрямком напруженості поля і нормаллю до поверхні в діелектрику; 2) напруженість поля в діелектрику; 3) густину зв'язаних зарядів на межі повітря-діелектрик, якщо напруженість поля ставить $E = 23 \cdot 10^4$ *В/м*.

Розв'язок:



1) При переході з одного діелектрика в іншій силові лінії напруженості заломлюються за законом:

$$\frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}; tg\alpha_2 = \frac{\varepsilon_2 tg\alpha_1}{\varepsilon_1}.$$

$\alpha_1 = 90^0 - \alpha = 30^0$; $\varepsilon_1 = 1$; $\varepsilon_2 = \varepsilon$;

отже: $\alpha_2 = \varepsilon\, arctg30^0$

2. Нормальні складові напруженостей $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_2$ у відповідних середовищах визначається співвідношенням:

$$\frac{tg\alpha_1}{tg\alpha_2} - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{E_{2n}}{E_{1n}};$$

а тангенціальні складові $E_{1t} = E_{2t}$.

Отже. можемо записати:

$$E_2 = \frac{E_{1\cdot}\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2};$$

$$E_2 = 1{,}03 \cdot 10^4 \ \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

3. Поверхнева густина зарядів σ' чисельно дорівнює нормальній складовій вектора поляризації діелектрика:

$$P_2 = \varepsilon_0 \alpha E_2 = \varepsilon_0(\varepsilon_2 - 1)E_2 ,$$

а нормальна складова вектора поляризації :

$$\vec{P}_{2n} = \vec{P}_2 \cos\alpha_2 ,$$

отже

$$\sigma' = 2P_{2n} = \tau_0(\varepsilon_2 - 1)E_2 \cos\alpha_2 = \frac{\varepsilon_{0\cdot(\varepsilon_2 - 1)} E_1 \sin\alpha_1 \cdot \cos\alpha_2}{\sin\alpha_2} =$$

$$= \frac{\varepsilon_{0\cdot(\varepsilon_2 - 1)} E_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \cos\alpha_1}{\varepsilon_2};$$

$$\sigma' \approx 3{,}8 \cdot 10^{-7} \ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

Практичне заняття № 8.

ЕНЕРГІЯ ТА ГУСТИНА ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 21.1, 21.3, 21.8, 21.13, 21.15.
дома: [5] 3.149 – 3.152, 3.158 – 3.162, 3.166 – 3.168.

Задача № 8.1.
Відстань між пластинами плоского конденсатора $d = 2см$, різниця потенціалів $U = 6000В$. Заряд кожної пластини $q = 10^{-8}Кл$. Обчислити енергію W поля конденсатора та силу F взаємного притягання пластин.

Розв'язок:

Енергію електричного поля конденсатора обчислимо як:

$$W = \frac{Uq}{2}. \; ; \qquad W = \frac{10^{-8}6 \cdot 10^{3}}{2} = 3 \cdot 10^{-5}(Дж)$$

Сила, з якою одна з пластин притягує другу пластину дорівнює добуткові заряду на одній з пластин q на напруженість поля E_1, створеного іншою пластиною. Ця напруженість E_1 буде дорівнювати половині напруженості поля конденсатора (поля, створеного обома пластинами):

$$F = qE_1 = q\frac{E}{2} = \frac{qU}{2d} = \frac{W}{d} = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \; Н$$

Задача № 8.2.
Сила взаємного притягання між пластинами плоского конденсатора $F=5 \cdot 10^{-2}Н$. Діелектрик – повітря. Площа кожної пластини $S=200см^2$. Визначити густину енергії w поля конденсатора.

Розв'язок:

Густина енергії електричного поля конденсатора дорівнює: $w = \frac{W}{V}$,

тут $V = S \cdot d$ – об'єм простору між пластинами. Для обчислення енергії поля конденсатора скористаємося розв'язком попередньої задачі: $W = F \cdot d$, тоді:

$$w = \frac{F \cdot d}{V} = \frac{F \cdot d}{S \cdot d} = \frac{F}{S} \cdot \quad w = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-2}} = 2{,}5 Дж/м^3$$

Задача № 8.3.

Плоский повітряний конденсатор складається з двох круглих пластин радіусом r = 1*см* кожна. Відстань між пластинами d_1 = 1*см*. Конденсатор зарядили до різниці потенціалів U = 1200*В* і відімкнули від джерела напруги. Яку роботу A потрібно виконати, щоб збільшити відстань між пластинами до d_2 = 3,5*см*?

Розв'язок:

Робота, яка виконується при розведенні пластин, іде на збільшення енергії електричного поля конденсатора: $A = W_2 - W_1$. ***Відповідно:***

$$A = W_2 - W_1 = \frac{C_2U_2^2}{2} - \frac{C_1U_1^2}{2}.$$

Якщо конденсатор був відключеним від джерела, то заряд на пластинах залишався сталим:

$q_1 = q_2$; $U_1C_1 = U_2C_2$.

Звідки: $$A = W_2 - W_1 = \frac{C_2U_1^2C_1^2}{2C_2^2} - \frac{C_1U_1^2}{2} = \frac{C_1U_1^2}{2}\left(\frac{C_1}{C_2} - 1\right) = \frac{C_1U_1^2}{2C_2}(C_1 - C_2).$$

$$A = \frac{d_2U_1^2\pi r^2\varepsilon_0}{d_1 2d_1d_2}(d_2 - d_1) = \frac{\pi r^2\varepsilon_0U_1^2}{2d_1^2}(d_2 - d_1). \quad A = 50\cdot10^{-6}\,Дж$$

Задача № 8.4.

Конденсатор ємністю C_1 = 700*нФ* зарядили до різниці потенціалів U = 1500*В* і відімкнули від джерела напруги. Після цього до нього приєднали другий незаряджений конденсатор ємністю C_2 = 400*нФ*. Яка кількість енергії, запасеної в першому конденсаторі, була використана на утворення іскри, що виникла при з'єднанні конденсаторів?

Розв'язок:

На утворення іскри була витрачена енергія рівна різниці між енергією першого конденсатора та енергією системи з двох конденсаторів після їх з'єднання.

$$\Delta W = W_1 - W_2$$

$$W_1 = \frac{1}{2}C_1U_1^2; \quad W_2 = \frac{1}{2}(C_1 + C_2)U_2^2;$$

тут $(C_1 + C_2)$ – ємність паралельного з'єднання першого та другого конденсаторів, а U_2 - різниця потенціалів, яка на них встановиться після з'єднання.

Цю різницю потенціалів U_2 визначимо виходячи з того, що при відключення першого конденсатора від джерела заряд на його обкладках залишається сталим і розподіляється між першим і другим конденсаторами після їх з'єднання:

$$C_1U_1 = (C_1 + C_2)U_2 \text{ отже } U_2 = C_1U_1/(C_1 + C_2)$$

Звідси обчислимо енергію системи з двох конденсаторів після їх з'єднання:

$$W_2 = \frac{1}{2}(C_1 + C_2)U_2^2 = \frac{1}{2}\frac{(C_1 + C_2)C_1^2U_1^2}{(C_1 + C_2)^2} = \frac{1}{2}\frac{C_1^2U_1^2}{C_1 + C_2};$$

Тоді енергія, яка витрачена на утворення іскри:

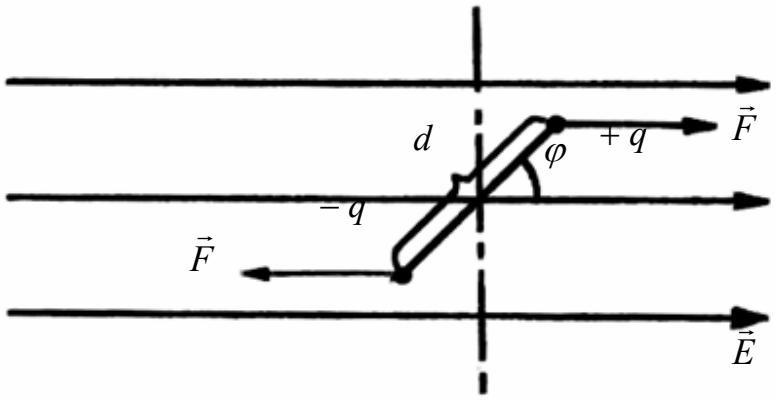
$$\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{1}{2}C_1U_1^2\left(1 - \frac{C_1}{C_1 + C_2}\right);$$

$$\Delta W = 2{,}8\cdot10^{-4} Дж$$

Задача № 8.5.

Визначити енергію диполя, який міститься в однорідному електростатичному полі напруженістю $E=3\cdot10^2 В/м$, якщо плече диполя утворює кут $\varphi=30^0$ з напрямом напруженості зовнішнього поля. Електричний момент диполя $p=4\cdot10^{-9} Кл\cdot м$.

Розв'язок:



Сили, що діють на заряди диполя відповідно дорівнюють $+qE$ та $-qE$ і утворюють пару сил з моментом $M = qEd\sin\varphi = pE\sin\varphi$.

При повороті диполя на елементарний кут $d\varphi$ електричні сили виконують елементарну роботу $dA = Md\varphi = pE\sin\varphi\cdot d\varphi$. Саме на цю величину змінюється енергія диполя при його обертанні на кут $d\varphi$.

Максимальний запас енергії диполь матиме при $\varphi = \frac{\pi}{2}$ і мінімальній при φ=0. Запас енергії диполя, вісь якого з вектором напруженості поля утворює кут 30^0, визначається роботою, яка виконується зовнішніми силами при повороті осі диполя від положення з $\varphi = \frac{\pi}{6}$ до φ=0.

$$W = A\int_{\varphi}^{0} pd\varphi = \int_{\varphi}^{0} pE\sin\varphi\cdot d\varphi = -pE\cos\varphi\Big|_{\frac{\pi}{6}}^{0} = -pE\left(1-\sqrt{\frac{3}{2}}\right) =$$

$$= -pE\left(\frac{2-\sqrt{3}}{2}\right) = -0{,}15\,pE;\ W = -1{,}8\cdot 10^{-7}\ \text{Дж}.$$

Задача № 8.6.

Простір між пластинами плоского конденсатора площею пластин 200 *см* і відстанню між ними 0,1*см* повністю заповнений склом $(\varepsilon = 5)$. Як зміниться енергія конденсатора, якщо відняти діелектрик? Задачу розв'язати при таких умовах: 1) конденсатор весь час приєднано до батареї ЕРС=300*В*; 2) конденсатор був спочатку приєднаний до цієї батареї і після зарядки від'єднаний від неї. Знайти механічну роботу, яка витрачається в обох випадках.

Розв'язок:

1) В першому випадку, як це витікає з умови задачі, різниця потенціалів між пластинами конденсатора при наявності діелектрика і без нього залишається сталою. Змін зазнає величина заряду, що накопичується на пластинах при напрузі 300*В*. Виразимо енергію конденсатора через напругу.

Енергія поля конденсатора з діелектриком:

$$W_1 = \frac{C_1U^2}{2}\ ;$$

і без діелектрика:

$$W_2 = \frac{C_2U^2}{2};$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\cdot S}{d};\ C_2 = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_0\cdot S}{d};\ \varepsilon_1 = 1.$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_0\cdot SU^2}{2d} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0\cdot SU^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_1-\varepsilon)\cdot U^2S}{2d};$$

$$\Delta W = 3{,}18\cdot 10^{-5}\ \text{Дж}.$$

2) В другому випадку заряд залишається сталим, і енергію конденсатора доцільно виразити через величину заряду:

$$W_1 = \frac{q^2}{2c_1}; \quad W_2 = \frac{q^2}{2c_2};$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{q^2}{2c_2} - \frac{q^2}{2c_1} = \frac{\varepsilon_0^2\varepsilon^2 U^2 S^2 d}{2\varepsilon\varepsilon_0 \cdot Sd^2} - \frac{\varepsilon_0^2\varepsilon_1^2 U^2 S^2 d}{2\varepsilon_1\varepsilon_0 \cdot Sd^2} - = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2 S(\varepsilon - \varepsilon_1)}{2d\varepsilon_1};$$

$$\Delta W \approx 1{,}6 \cdot 10^{-4}\ \text{Дж}.$$

Як це видно з розв'язків задачі, робота в другому випадку більша, і вона йде на збільшення енергії конденсатора. Це відбувається тому, що при виведенні скляної пластина в першому випадку залишається сталою напруженість поля конденсатора. В другому випадку напруженість поля збільшується. Тобто у першому випадку при виведенні пластини, виконується механічна робота, яка іде на зменшення енергії конденсатора та збільшення енергії джерела *EPC*. Робота виконується проти джерела. У другому випадку виконується механічна робота, що дорівнює збільшенню енергії конденсатора.

$$A_1 = A \to \Delta W = \Delta\sigma U + \Delta W = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon - \varepsilon_1)U^2 S}{d} + \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon)U^2 S}{2d} =$$

$$= \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon)U^2 S}{2d};\ A_1 = -3{,}18 \cdot 10^{-5}\ \text{Дж};\ A_2 = \Delta W = 1{,}6 \cdot 10^{-4}\ \text{Дж}.$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО Розв'язування З ЕЛЕКТРОСТАТИКИ

1. Чотири однакових заряди q розташовані у вершинах квадрату з стороною a. Який заряд треба вмістити у центр квадрату для рівноваги всієї системи?

(Умова рівноваги $\sum_{i=1}^{n} F_i = 0$, тоді q_x=0,96q)

2. Два заряди знаходяться на відстані r. Якщо відстань між ними змінити на 0,5м, то сила взаємодії зміниться вдвічі. Визначити початкову відстань між зарядами.

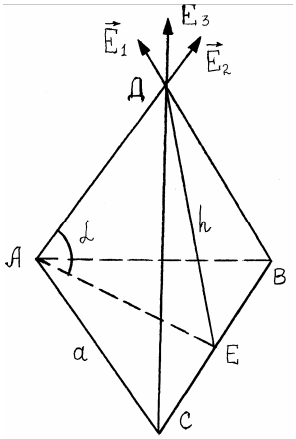
(розглянувши всі можливі випадки, дістанемо $r_{1,2} = \Delta r(2 + \sqrt{2})$м)

3. Дві однакові кулі підвішені на однакових за довжиною нитках у одній точці. При наданні їм однакових електричних зарядів вони розходяться на однакові кути у повітрі та рідині густиною ρ_0 і діелектричною провідністю ε. Визначити густину речовини кульок.

(розглянувши умову рівноваги кульок у повітрі, дістанемо: $\rho Vgl^2 \sin^3\alpha = kq^2$ у рідині $\rho Vgl^2 \sin^3\alpha - \rho_0 Vgl^2 \sin^3\alpha = k\frac{q^2}{\varepsilon}$. Остаточно: $\rho = \rho_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$)

4. Два однакові нерухомі заряди q розташовані на відстані r один від одного. Вздовж осі симетрії може вільно рухатись частинка масою m, заряд якої дорівнює $-\eta q$. Вважаючи відхилення частинки від положення рівноваги малими, визначити період її коливань.

(якщо скористатися законом коливання пружинного маятника та визначити силу, дістанемо $T = \sqrt{\pi^3 \varepsilon_0 m r^3 / (\eta q^2)}$**.**



5. Три однакові нерухомі заряди q розташовані у вершинах рівностороннього трикутника із стороною a. Визначити напруженість поля у вершині правильного тетраедра, що побудований на цьому трикутнику.

(аналіз рисунка дає можливість встановити, що вертикальні складові відповідних векторів напруженості однакові на рівні $kq\sin\alpha/a^2$. враховуючи рівність нулю горизонтальних складових дістанемо $E = k\sqrt{6}\frac{q}{a^2}$)

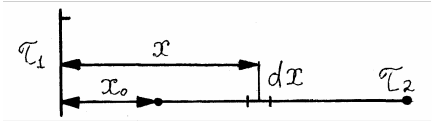
6. Визначити потенціал поверхні Землі, якщо відомо, що Земля заряджена негативно і напруженість поля біля поверхні становить 130 В/м.

(8,32 МВ)

7. Визначити напруженість поля між трьома металевими пластинами однакової площі S. Відстань між крайніми і середньою пластинами дорівнюють r_1 і r_2. Середня пластина має заряд $+q$. Крайні пластини з'єднані між собою.

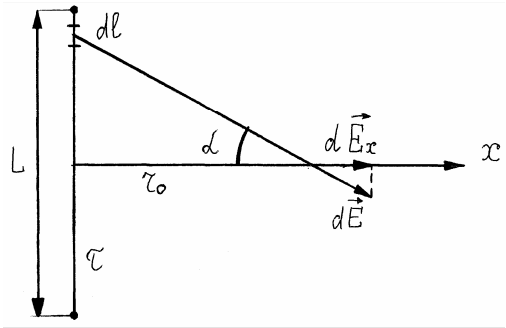
(враховуючи еквіпотенціальність крайніх пластин і закон збереження зарядів, маємо: $\left|\vec{E}_1\right| = \frac{r_2}{r_1 + r_2} \cdot \frac{q}{\varepsilon_0 S}; \left|\vec{E}_2\right| = \frac{r_1}{r_1 + r_2} \cdot \frac{q}{\varepsilon S}$**).**

8. Визначити силу взаємодії між нескінченною прямою, що заряджена з лінійною густиною 0,3 мкКл/м та рівномірно зарядженим дротом довжиною 0,2 м з лінійною густиною 0,2 мкКл/м. Нитка і дротина розташовані взаємно перпендикулярно і в одній площині.



(Оскільки взаємодія цих заряджених тіл не може бути визначена за законом Кулона, слід скористатись таким виразом: $dF = Edq = \frac{\tau_1 \tau_2}{2\pi\varepsilon_0 x} dx$**;** $F = 1{,}2$ ***мН)***

9. Провідник довжиною L рівномірно заряджений і характеризується лінійною густиною τ. Визначити напруженість поля в точці, яка лежить на перпендикулярі до середини провідника на відстані r_0 від нього.



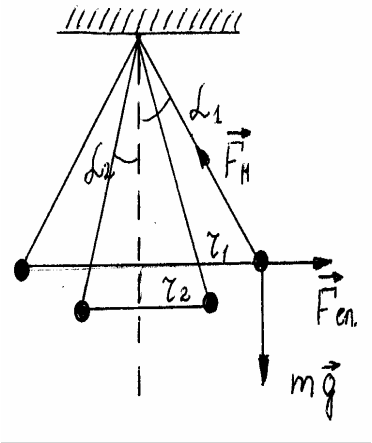
По аналогії з задачею №3 скористаємось рисунком і запишемо: $\mathbf{dE=k\tau dl/(l^2+r^2)}$.

Враховуючи, що $\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} dE_x = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} dE\cos\alpha$ ***а також, що*** $\cos\alpha = \frac{r_0}{\sqrt{l^2 - r_0^2}}$ ***дістанемо:***

$$E = \frac{2k\tau_1}{r_0} \cdot \frac{l}{\sqrt{l^2 + r_0^2}}\Bigg|_0^L = \frac{2k\tau L}{r_0\sqrt{l^2 + r_0^2}}$$

варто розглянути випадки: 1) $\mathbf{r_0 >> L}$ ***і 2)*** $\mathbf{r_0 << L}$.

10. Дві однакові металеві кульки підвішені в одній точці на довгих шовкових нитках. Заряджені однаковими зарядами кульки розійшлись на відстань 5 см. Яка відстань встановиться між кульками, якщо одну з них розрядити?



(Слід зауважити, що після зняття заряду з однієї з кульок, кульки зіткнуться, і заряд перерозподілиться між ними, після чого розійдуться на відстань $\mathbf{r_2}$. ***Тоді:*** $q_1' = q_2' = \frac{q}{2}$***)***

11. Дві однакові мідні кулі мають заряди + $9{,}3\times10^{-9}$ Кл і $-1{,}3\times10^{-9}$ Кл. після їх зіткнення кулі розсунуті на 2 см. Визначити силу взаємодії між кульками після зіткнення? ($3{,}6\times10^{-4}$Н).

12. Визначити силу взаємодії між двома точковими зарядами по 1 Кл на відстані 10 м один від одного у вакуумі. Чи правдоподібна одержана відповідь з погляду фізики?

13. Куля діаметром 8 см має заряд $6{,}7\times10^{-9}$ Кл, а куля діаметром 12 см – заряд 9×10^{-9} Кл. Які будуть заряди куль після з'єднання їх тонким провідником?

($9{,}4\times10^{-9}$ Кл і $6{,}3\times10^{-9}$ Кл)

14. Якщо змінити відстань між зарядами на 0,5 м, то сила взаємодії збільшиться в два рази. Яка була початкова відстань між зарядами? (1,7 м)

15. У скільки разів сила гравітаційного притягання менша (більша) сили електричного відштовхування двох електронів? ($4{,}2\times10^{42}$ рази).

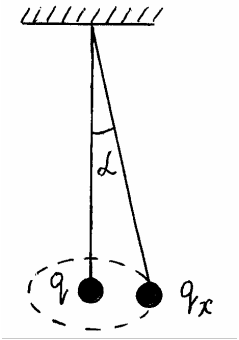
16. В системі з двох тіл, заряджених зарядами 30 нКл, одне, маса якого 0,7 г, знаходиться в точці підвісу другого. Довжина нитки підвісу 0,1 м. Знайти прискорення підвішеного тіла в момент розриву нитки, якщо до цього моменту тіла не рухались. ($10{,}97$ м/с^2).

17. Три однакові маленькі кульки масою по 0,1 г підвішені в одній точці на шовкових нитках довжиною по 20 см. Які однакові заряди треба надати кулькам, щоб кожна нитка утворювала з вертикаллю кут 30^0 ?

($3{,}3\times10^{-8}$ Кл).

18. У центрі рівностороннього трикутника міститься точковий заряд. Визначити величину цього заряду, якщо в вершинах трикутника знаходяться заряди $3{,}43\times10^{-8}$ Кл і система перебуває в рівновазі.

($-1{,}98\times10^{-8}$ Кл)



19. Навколо нерухомого точкового заряду q в одній площині з ним обертається підвішена на нитці довжиною 1,2 м кулька масою 2г і зарядом q. Визначити величину заряду кульки, якщо період її обертання 3,2 с, а кут відхилення нитки від вертикалі $\alpha=25^0$ ($3{,}8\times10^{-7}$ Кл).

20. Знайти питомий заряд залізної кульки, яка здійснює 0,8 об/с по колу радіусом 3см, в центрі якого знаходиться заряд 5нКл.

21. Знайти напруженість поля заряду 36 нКл в точках, віддалених від заряду на 9 і 18 см.

22. Заряджена куля має поверхневу густину заряду σ . Визначити напру-женість електричного поля на поверхні кулі.

23. Однорідне електричне поле напруженістю E утворене двома зарядженими вертикальними пластинами. У полі розміщена кулька масою 6 г, підвішена на нитці. Знайти кут відхилення нитки, якщо кульці надали заряд q.

24. Відстань між двома точковими зарядами $+10^{-3}$; -5×10^{-3} Кл дорівнює 10 см. Визначити напруженість поля зарядів в точці, віддаленій на 8 см від першого і на 6 см від другого заряду.

($1{,}26\times10^{5}$ В/м).

25. Краплинка масла діаметром 0,1 мм рівноприскорено піднімається (a = 0,2 м/с^2) в однорідному вертикальному електричному полі. Визначити напруженість електричного поля, якщо заряд краплі 10^{-12} Кл, а густина масла 8×10^{2} кг/м^3.
($4{,}2\times10^{3}$ В/м).

26. Визначити напруженість електричного поля, створеного двома паралельними нескінченними пластинами з поверхневими густинами зарядів: 4×10^{-7} і 10^{-7} В/м^2. ($2{,}83\times10^{4}$ В/м; $1{,}7\times10^{4}$ В/м).

27. Потенціали двох ізольованих провідників дорівнюють +30 і –20 В. Яка робота виконується при перенесенні заряду 6×10-6 Кл з одного провідника на другий?
(3×10^{-4} Дж).

28. Яку відстань пролетить електрон в однорідному електричному полі напруженістю 150 В/м до зупинки, якщо він влітає в поле з початковою швидкістю 5×10^{6} м/с в напрямі ліній напруженості поля.
(0,47 м)

29. Якою повинна бути напруженість електричного поля, щоб маючи довжину вільного пробігу 5×10^{6} м та швидкість $2{,}3\times10^{6}$ м/с, електрон зміг іонізувати повітря (3×10^{6} В/м).

30. Дві паралельні площини, відстань між якими набагато менша за їх лінійні розміри, зберігають заряди по 10^{-3} Кл. Площа кожної пластини 100 см^2 Визначити силу з якою взаємодіють пластини. Поле між пластинами вважати однорідним. (6×10^{-4} Н).

31. Визначити напруженість електричного поля Землі, якщо її заряд $5{,}7\times10^{5}$ Кл, а радіус 6371 км. (130 В/м)

32. Якою має бути напруженість однорідного поля в вакуумі, щоб електрон дістав прискорення 2×10^{12} м/с^2 . Через який час швидкість електрона в полі дорівнюватиме 5×10^6 м/с^2, якщо його початкова швидкість дорівнює нулю.
(11 В/м; $2{,}5\times10^{-6}$ с)

33. Визначити напруженість поля в точці, що розміщена посередині між зарядами 2×10^{-7} ; -4×10^{-7} Кл, які містяться в скипидарі.
(10^6 В/м).

34. При відстані між обкладинками конденсатора 1 мм різниця потенціалів між ними 100 В. Яка різниця потенціалів встановиться між обкладинками, якщо їх розсунути на 5 мм і помістити між ними шар ебоніту? Діелектрична проникність ебоніту – 3. (167 В).

35. В полі з напруженістю 1 кВ/м переміщується заряд 25 мКл в напрямку силових ліній на 2 см. Знайти роботу і різницю потенціалів між початковою і кінцевою точкою переміщення. (0,5 мкДж; 20 В).

36. У двох точках поля точкового заряду напруженість поля відрізняється в 4 рази. У скільки разів відрізняється в цих точках потенціал поля? (2).

37. Яка поверхнева густина заряду металевої кулі радіусом 2,1 см, якщо її потенціал становить 792 В ? ($3{,}3\times10^{-7}$ Кл/м^2).

38. Два провідники з однаковими зарядами мають потенціал 40 і 60 В. Який встановиться потенціал цих провідників, якщо їх з»єднати тонким дротом?
(48 В).

39. Крапельки ртуті радіусом 0,1 см мають однакові заряди $6{,}7\times10^{-14}$ Кл. Десять таких крапельок злилися в одну краплю. Який встановиться потенціал великої краплі? (2,8 В).

40. Куля має заряд 5×10^{-8} Кл, а її потенціал 20 кВ. Знайти електроємність і радіус кулі. (2,5 пФ; 2,3 см).

41. Визначити ємність конденсатора, якщо площа кожної з пластин 200 см^2, а товщина слюдяного листа між ними 0,1 см. (1060 пф).

42. Який заряд необхідно надати двом паралельно з`єднаним конденсаторам ємністю 1 і 2 мкФ, щоб створити батарею напругою 20 кВ? (0,6 мкКл).

43. При збільшенні напруги, що подається на конденсатор ємністю 20 мкФ, в два рази, енергія поля зростає на 0,3 Дж. Знайти початкове значення напруги та енергії поля.

МОДУЛЬ №2 “ПОСТІЙНИЙ СТРУМ “

ПОРАДИ ДО РОЗВ`ЯЗКУ ЗАДАЧ НА ПОСТІЙНИЙ СТРУМ.

Відповідно до тематики практичних занять до даного модуля включено задачі таких основних груп:

1. Визначення електричних параметрів ділянки кола та повного кола в залежності від зміни електричних параметрів на основі законів Ома.
2. Визначення електричних параметрів розгалужених кіл.
3. Теплова дія струму. Закон Джоуля-Ленца
4. Струм в металах. Контактні явища.
5. Електричний струм в електролітах, газах, напівпровідниках.

- При розв’язуванні задач, що віднесені до першої групи, головним завданням є визначення сили струму за спадом напруги або спаду напруги за зміною сили струму на ділянці кола чи повному колі, розрахунки опорів. Опір може бути заданий в явному або опосередкованому вигляді. В задачах такого типу можна виділити такі завдання:

а) визначити сили струму на ділянці електричного кола за спадом напруги чи опором та величиною сили струму, що протікає через опір ;

б) визначення параметрів, якщо опір ділянки кола є функцією температури, часу або лінійних розмірів.

в) визначення сили струму або спаду напруги на ділянці кола, якщо ці параметри змінюються з часом;

г) визначення електричних параметрів неоднорідної ділянки і повного кола;

д) розв’язування задач комбінованих на основі перерахованих завдань.

- При розв`язуванні задач, що віднесені до другої групи цього розділу можливі декілька підходів:

а) Використовують співвідношення між струмами і опорами в розгалужених або неоднорідних колах.

б) Складні розгалужені кола спрощують і заміняють еквівалентними схемами.

в) Використовуються правила Кірхгофа.

При складанні рівнянь за правилами Кірхгофа необхідно:

- поділити складне розгалужене коло на прості контури і довільно визначити напрями струмів на окремих їх ділянках;
- довільно вибрати напрями обходу окремих контурів (наприклад, за годинниковою стрілкою);
- застосувати перше правило Кірхгофа для одного з вузлів;

- застосувати друге правило Кірхгофа для кожного з простих контурів керуючись *правилом знаків*:

а) якщо вибраний технічний напрям струму в ділянці співпадає з вибраним напрямком обходу контуру, то спади напруг на відповідних опорах беруть із знаком "+", якщо ні - зі знаком "-";

б) якщо джерело е.р.с, що міститься на простій ділянці підсилює струм у вибраному напрямі обходу контуру, то його беруть зі знаком "+", якщо послаблює, то зі знаком "-".

- скласти достатню кількість незалежних рівнянь. Загальне число рівнянь має відповідати загальному числу невідомих в задачі. За першим правилом Кірхгофа складають на одне рівняння менше, ніж є вузлів у колі. Рівняння для останнього вузла вже не буде незалежним. При складанні рівнянь згідно другого правила Кірхгофа слід дотримуватись такого принципу, щоб до кожного нового контуру входила хоча б одна нова вітка, яка не використовувалася в попередніх контурах.

- Задачі, що віднесені до третьої групи, пояснюють фізичні явища, які виникають при проходженні струму в провідниках першого і другого роду, а саме, роботу і потужність на ділянці кола і повному колі та теплову дію струму. Їх розв`язок базується на використанні законів Ома і Джоуля-Ленца в інтегральній і диференціальній формах.

- Розв`язуючи задачі четвертої групи, необхідно згадати, що:

а) Частина електронів у металах перебуває в стані безперервного хаотичного руху і являє собою “електронний газ”. А тому до нього можуть бути застосованими закономірності кінетичної теорії газів.

б) Внаслідок різної концентрації електронів в металах і різниці робіт виходу електронів з металів при однаковій їх температурі між з`єднаними металами існує контактна різниця потенціалів.

в) Якщо існує різниця температур між спаями різнорідних металів, то між цими спаями виникає термоелектрорушійна сила.

- При розв’язуванні задач, що віднесені до п’ятої групи, слід підкреслити, що в них є спільним процеси - перенесення в електричному полі частинок, що мають заряд.

ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ І ФОРМУЛИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ РОЗВ’ЯЗУВАННІ ЗАДАЧ НА ПОСТІЙНИЙ СТРУМ.

Сила електричного струму визначається кількістю електрики, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$I = \frac{dq}{dt}$, або для постійного струму: $I = \frac{q}{t}$.

Густина струму $\vec{j}$ – вектор, напрям якого збігається з напрямом напруженості електричного поля. В загальному вигляді:

$j = \frac{dI}{dS}$ і для постійного струму: $j = \frac{I}{S}$.

Опір провідника довжиною *l* і площиною перерізу *S* визначається як:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де ρ – питомий опір провідника при температурі t^0C:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

де ρ_0 – питомий опір провідника при 0^0C, α – температурний коефіцієнт опору, *t* – температура провідника в градусах шкали Цельсія.

Залежність сили струму від напруги і опору провідника визначається законом Ома для ділянки кола:

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

Закон Ома в диференціальній формі:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho}\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

Закон Ома для повного кола: $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$,

де *r* – внутрішній опір джерела струму з е.р.с. = ε.

Густина струму в металі: $\vec{j} = en_0\vec{\upsilon}$,

де *e* – заряд електрона, n_0 – концентрація вільних електронів, $\vec{\upsilon}$ – середня швидкість напрямленого руху електронів.

Опір кола, що складається з *n* послідовно сполучених провідників:

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i.$$

Опір кола, що складається з *n* паралельно сполучених провідників:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$$

Перше правило Кірхгофа для розгалуження (правило вузлів):

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

Друге правило Кірхгофа:

$$\sum_{m=1}^{n} I_m R_m = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i .$$

робота електричних сил на ділянці кола з опором R:

$$A = q \cdot U = I \cdot U \cdot t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t .$$

Повна робота джерела струму у замкненому полі:

$$A = I \cdot \varepsilon \cdot t$$

Кількість теплоти, що виділяється в електричному полі, визначається за формулою:

$$Q = I \cdot U \cdot t$$

Закон Джоуля-Ленца в диференційній формі:

$$w = jE = \sigma E^2 ,$$

де $w = \frac{Q}{Vt}$ – об'ємна густина теплової потужності.

Між двома металами, що мають однакову температуру існує контактна різниця потенціалів:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} ,$$

де A_1, A_2 – роботи виходу електронів з першого і другого провідника; n_1, n_2 – концентрації вільних електронів у першому і другому металах відповідно.

Термоелектрорушійна сила:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_1 - T_2) = \alpha (T_1 - T_2).$$

Сила термоелектричного струму у вакуумі визначається за формулою Богуславського - Ленгмюра:

$$I = BU^{\frac{3}{2}},$$

де B -стала, яка залежить від форми електродів та їх взаємо положення.

Густина струму термоелектронної емісії

$$j = BT^2 e^{\frac{-e\varphi}{kT}},$$

де B – емісійна стала, $e\varphi$ – робота виходу електрона з катода.

Маса m речовини, що виділяється на електроді при проходженні через електроліт, визначається за законом Фарадея:

$$m = kIt = kq, \quad \text{або} \qquad m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{z} It$$

де k – електрохімічний еквівалент речовини, $F = 9{,}65 \cdot 10^4$ *Кл/моль* – стала Фарадея, А – атомна маса, z – валентність, яку проявляє хімічний елемент в даному хімічному з'єднанні.

Питома електропровідність власних напівпровідників:

$$\sigma = en\,(U_n + U_p),$$

де $U_n + U_p$ – рухливість електронів та рухливість дірок.

Практичне заняття № 9.

ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЗАКОНИ ОМА.

Задачі, рекомендовані для розвязку

в аудиторії: [6] 22.1 – 22.12.

дома: [5] 3.178, 3.179, 3.181, 3.187 – 3.195.

Задача № 9.1.

Сила струму в провіднику рівномірно наростає від $I_0=0$ до $I=3A$ за час $t=10c$. Визначити заряд q, що пройшов по провіднику за цей час.

Розв'язок:

Сила струму в провіднику визначається як похідна заряду по часу $I=dq/dt$. При цьому слід врахувати, що сила струму за умовою змінюється за лінійним законом $I = I_0 + kt$.

$$dq = I\cdot dt \quad \textit{або} \quad dq = (I_0 + kt)dt \textit{, отже:}$$

$$q = \int_0^t (I_0 + kt)dt = I_0\int_0^t dt + k\int_0^t tdt = I_0 t + \frac{kt^2}{2}$$

за умовою $I_0=0$, $I=3A$. Звідси знайдемо коефіцієнт k: $k=(I - I_0)/t = I/t$.

Таким чином: $$q = \frac{It^2}{2t} = \frac{It}{2}\ ; q = 15\ Кл.$$

Задача № 9.2.
Визначити величину заряду, який пройшов по мідному провіднику довжиною $l=20м$ і площею поперечного перерізу $S=0,17м^2$ при температурі 20°С, якщо напруга на його на кінцях змінилася протягом 20 секунд від $U_0=2\ В$ до $U=4В$.

Розв'язок:

Так як сила струму в провіднику змінюється, тому для обчислення величини заряду скористаємось підходом попередньої задачі: $I = \frac{dq}{dt};\quad dq = Idt$. Звідси: $q = \int_0^t Idt$. Виходячи з закону Ома: $q = \int_0^t \frac{U}{R}dt$, де спад напруги рівномірно зростає, тому $U = U_0 + ct$.

Звідси можна визначити сталу $c = \frac{U - U_0}{t}$. Підставивши цей вираз для обчислення q будемо мати: $q = \int_0^t \left(\frac{U_0}{R} + \frac{ct}{R}\right)dt = \frac{U_0}{R}\int_0^t dt + \frac{c}{R}\int_0^t tdt$. Після інтегрування в заданих межах, одержуємо: $q = \frac{U_0^2}{R} + \frac{ct^2}{2R} = \frac{t}{2R}(2U_0 + ct)$.

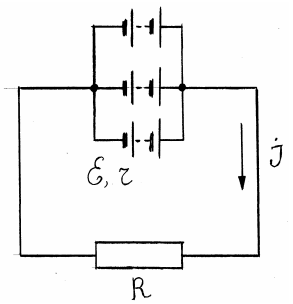
Підставивши значення C і спростивши, одержуємо: $q = \frac{t}{2R}(U_0 + U)$.

Значення R можна одержати, користуючись формулою $R = \rho\frac{l}{S}$.

Тоді : $q = \dfrac{tS}{2\rho l}\left(U_0 + U\right)$; q = *30 (Кл).*

Задача № 9.3.

Як потрібно з`єднати k=40 елементів ЕРС, що мають E=2В і r=0,1 Ом, щоб в колі з зовнішнім опором R=10 Ом пройшов максимальний струм?



Розв`язок:

Виходячи з закону Ома для повного кола з комбінованим з`єднанням елементів, запишемо: $I = \dfrac{k\varepsilon}{n\alpha + mr}$,

де $k = mn$, $\boldsymbol{n}$ – кількість паралельних рядів,
$\boldsymbol{m}$ – кількість послідовно з`єднаних елементів.

В колі значення сили струму буде максимальним тоді, коли зовнішній опір кола дорівнюватиме внутрішньому опору всіх джерел ЕРС. З цих міркувань можна обчислити кількість паралельних груп $\boldsymbol{n}$ і кількість послідовно з`єднаних елементів $\boldsymbol{m}$:

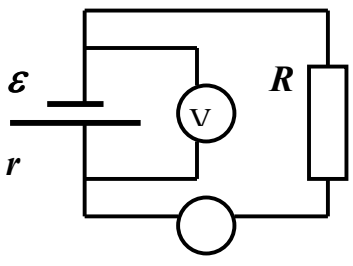
$$\boldsymbol{nR = mr}\ ; \quad \frac{m}{n} = \frac{R}{r} = \frac{m^2}{nm} = \frac{m^2}{k^2}. \qquad \frac{R}{r} = \frac{m^2}{k};$$

$$m = \sqrt{k\frac{R}{r}} = 200\ ;\ n = \frac{k}{m} = 2\ ;\ I = \frac{400 \cdot 2}{20 + 20} = 20(A).$$

Задача № 9.4.

Електричне коло складається з джерела струму з внутрішнім опором $\boldsymbol{r}$*=0,2Ом* і зовнішнього $\boldsymbol{R}$*=12Ом*. Знайти силу струму $\boldsymbol{I}$ в зовнішньому колі, ЕРС джерела якщо вольтметр показує $\boldsymbol{U}$*=120В*. Який опір $\boldsymbol{R_x}$ потрібно включити в зовнішнє коло, щоб по ньому проходив струм $\boldsymbol{I_1}$*=1А*? Розрахувати також силу струму $\boldsymbol{I_{кз}}$ при короткому замиканні. Внутрішнім опором вольтметра нехтуємо.

Розв'язок:



Силу струму в зовнішньому колі обчислимо користуючись законом Ома для ділянки кола:

$\boldsymbol{I = U/R}$; $\boldsymbol{I}$ *= 120/12 = 10 А.*

Для обчислення ЕРС скористаємось

законом Ома для повного кола:

$I = \frac{\varepsilon}{R+r}(*)$; звідки $\boldsymbol{\varepsilon = I(R+r);}$ $\boldsymbol{\varepsilon} = 122B.$

Для обчислення опору $\boldsymbol{R_x}$ знову скористаємось законом Ома для повного кола

$R_x = \frac{\varepsilon}{I} - r$; $\boldsymbol{R_x} = 122 - 0,2 = 121,8\ (B)$

Коротке замикання відбувається при різкому зменшенні зовнішнього опору ($\boldsymbol{R} \to 0$). З урахуванням останнього формула (*) набуде вигляду:

$$\boldsymbol{I_{кз} = \varepsilon / r;} \qquad \boldsymbol{I_{кз}} = 122/0,2 = 610\ (A).$$

Задача № 9.5.

Опір вольфрамової нитки електричної лампочки при $\boldsymbol{t}=20^0C$ дорівнює $\boldsymbol{R}=35,9Ом$. Визначити температуру нитки. якщо лампочку ввімкнути в мережу $\boldsymbol{U}=220B$, і по нитці протікатиме струм $\boldsymbol{I}=0,6A$. Температурний коефіцієнт опору вольфраму дорівнює $\boldsymbol{\alpha} = 4,6 \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

Розв`язок :

Температуру нитки розжарення лампочки можна визначити виходячи з таких міркувань: $R_t = \rho_t \frac{l}{S}$ і $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$, а тому. враховуючи, що $\rho_t = \rho_0(1+\alpha t)$ можна записати $R_t = R_0(1+\alpha t)$. Звідси $t = \frac{R_t - R_0}{\alpha R_0}$.

Разом з тим опір $\boldsymbol{R}$ можна визначити, виходячи з закону Ома. Тобто при проходженні струму через нитку розжарення вона нагрівається до температури $\boldsymbol{t}$ і матиме опір R_t: $R_t = \frac{U}{I}$. Значення опору при $\boldsymbol{t}=0^0C$ можна визначити, виходячи з умови, що $R_1 = 35,9\ Ом$ при температурі 20^oC.

Отже, $R_1 = R_0(I + \alpha t_1)$, де $R_0 = \frac{R_1}{1+\alpha t_1}$

Таким чином: $t = \frac{\frac{U}{I} - \frac{R_1}{1+\alpha t_1}}{\alpha\left(\frac{R_1}{1+\alpha t_1}\right)} = \frac{U(1+\alpha t_1)^2 - IR(1+\alpha t_1)}{\alpha R_1} \approx 2200\ (^0C)$

Задача № 9.6.

Вугільний стержень з`єднаний в колі з залізним такої ж товщини. При якому співвідношенні їх довжин зміна спаду напруги на них залишатиметься постійною, не залежною від температури.

Розв`язок :

Як, відомо, в послідовно з`єднаних ділянках кола сила струму на цих ділянках однакова $I_1 = I_2$, а отже, виходячи з закону Ома, температурна зміна спадів напруги $\Delta U_1=\Delta U_2$ і буде залежати від температурної зміни опорів ΔR_1 і ΔR_2. Отже, $\Delta U_1=\Delta U_2$ при умові, якщо $\Delta R_1=\Delta R_2$, тобто повинна зберігатись рівність: $R_{t_1} - R_{0_1} = R_{t_2} - R_{0_2}$. Враховуючи, що: $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$, а $R_1=R_0(1+\alpha t)$ і підставивши ці значення у встановлену нами рівність, одержимо:

$$\rho_1 l_1 \alpha_1 = \rho_2 l_2 \alpha_2$$

Температура і площа перерізу ділянок провідників однакові.
Таким чином, зміна спадів напруги на ділянках вугільного і залізного стержнів залишатиметься незалежною від температури, якщо буде справедливим виведене нами співвідношення:

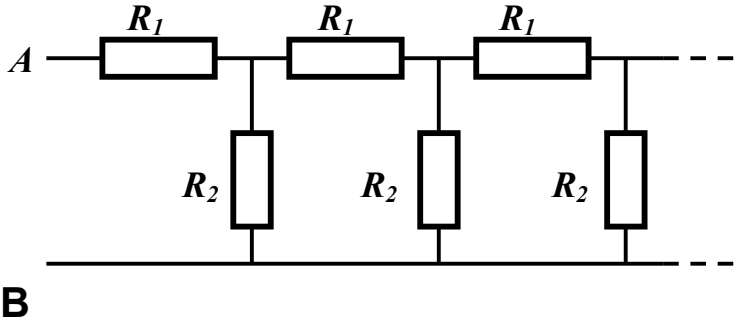
$$\frac{l_{зал}}{l_{вуг}} = \frac{\rho_{вуг}\alpha_{вуг}}{\rho_{зал}\alpha_{зал}}.$$

Практичне заняття № 10.

ОПІР ПРОВІДНИКІВ. З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ.

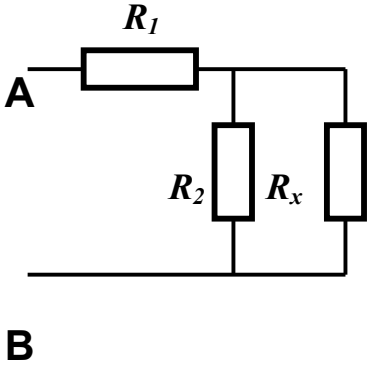
Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [5] 3.179 – 3.183, 3.185, 3.186.
дома: [6] 22.19 – 22.25.

Задача № 10.1.
Знайти опір R_x нескінченної ділянки, що складається з опорів R_1 та R_2.



Розв'язок:

При розгляді нескінченних ділянок виходять з того що, якщо від нескінченної ділянки відрізати одну ланку, загальний опір не зміниться. Тому представлена схема набуде спрощеного вигляду:



Таким чином опір нескінченної ділянки ***AB*** (R_x) можна обчислити як послідовне з'єднання опору R_1 з деяким опором ***R'***, який в свою чергу є паралельним з'єднанням опорів R_2 та R_x:

$$R_x = R_1 + R'; \qquad \frac{1}{R'} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_x}$$

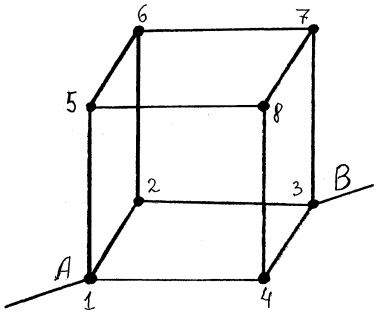
$$\text{або } R_x = R_1 + \frac{R_x R_2}{R_x + R_2}$$

$$\text{тобто } R_x^2 - R_x R_1 - R_1 R_2 = 0$$

$$R_x = \frac{R_1}{2}\left[1 + \sqrt{1 + 4\frac{R_2}{R_1}}\right]$$

Задача № 10.2.

12 провідників опором $R=1Ом$ кожний спаяні в куб. Визначити загальний опір з`єднання, якщо куб приєднаний до джерела струму в електричне коло вершинами по діагоналі грані.

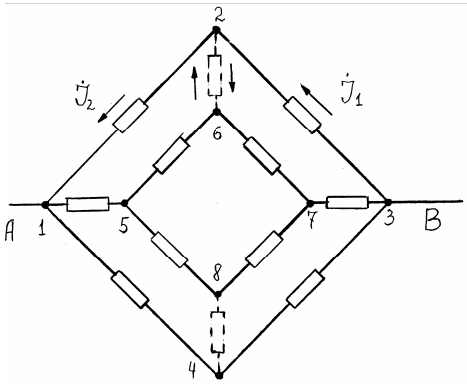


Розв`язок:

При розв`язуванні таких задач варто перейти від стереометричного до планіметричного зображення з`єднання. Цей процес буває досить важкий, а часом взагалі неможливий і не спрощує малюнок, якщо не використати правило нехтування чи заміни тих ділянок схеми, по яких не протікає струм внаслідок того, що їх кінці мають однаковий потенціал, тобто спад напруги на них дорівнюватиме нулеві.

Струми напрямків I_1 і I_2 на ділянці 2-6 мають протікати в протилежних напрямках. При цьому $\varphi_2 = \varphi_6$. Така ж ситуація на ділянці 4-8, де $\varphi_4 = \varphi_8$. Отже

значенням (присутністю) цих опорів при розрахунку повного опору куба можна знехтувати. Визначимо опір розгалужених ділянок 1, 2, 3; і 1, 4, 3, а також 1, 5, 7, 3, зауваживши, що ділянки 1, 5, 7, 3, є теж розгалуженими.



$$R_{1,2,3} = 2R = 2 \text{ (Ом)};$$

$$R_{1,4,3} = 2R = 2 \text{ (Ом)};$$

$$R_{1,5,7,3} = R_{1,5} + R_{7,3} + R';$$

$$\frac{I}{R'} = \frac{I}{2R} + \frac{I}{2R};$$

$$R_{1,5,7,3} = R + R + R = 3R = 3\,(\text{Ом});$$

$$\frac{1}{R_\Sigma} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{3R} = \frac{8}{6R};$$

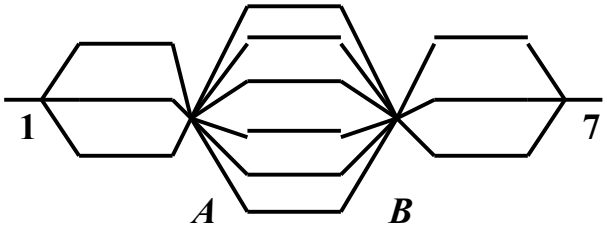
$$R_\Sigma = \frac{4}{3} \text{ (Ом)}$$

Задача № 10.3.

12 провідників опором ***R=1Ом*** кожний спаяні в куб. Визначити загальний опір з`єднання, якщо куб приєднаний до джерела струму в електричне коло вершинами по діагоналі куба. (Тобто вздовж діагоналі 1-7 рисунку попередньої задачі)

Розв`язок:

Для розв'язку цієї задачі необхідно визначити точки, що мають однаковий потенціал. Це точки 5,2,4 та 3,6,8 : $\varphi_5 = \varphi_2 = \varphi_4$; $\varphi_3 = \varphi_6 = \varphi_8$. Це тому, що ребра 1-5, 1-2, 1-4 та 7-3, 7-6, 7-8 абсолютно еквівалентні. Тому ці точки можна з'єднати між. Отримана при цьому схема буде еквівалентна вихідній схемі куба, але значно простішою:



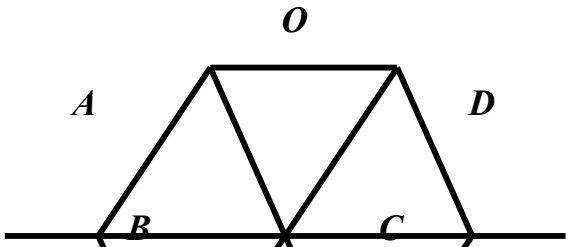
Точка ***A*** об'єднує точки 5,2,4, а точка ***B*** об'єднує точки 3,6,8. Ділянки ***1-A*** та ***B-7*** це паралельне з'єднання трьох опорів R_{1-5}, R_{1-2}, R_{1-4} та R_{7-3}, R_{7-6}, R_{7-8} відповідно. Ділянка ***A-B*** – паралельне з'єднання шести опорів R_{5-6}, R_{5-8}, R_{2-6} R_{2-3}, R_{4-8}, R_{4-3}. Загальний опір схеми між точками ***1-7*** буде розрахованим як послідовне з'єднання цих трьох ділянок ***1-A , A-B , B-7***:

$$R_{1-7} = \frac{1}{3}R + \frac{1}{6}R + \frac{1}{3}R = \frac{5}{6}R$$

Задача № 10.4. ***M*** ***N***

12 провідників опором ***R*** кожний спаяні так, як

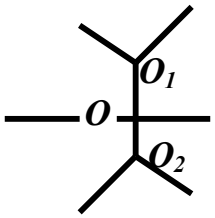
показано на схемі. Визначити загальний опір з`єднання, якщо схема приєднана до джерела струму в електричне коло точками ***A*** та ***D***.



Розв'язок:

Розв'язувати цю задачу можна було б так само, як і попередні. Тобто шукати точки, що мають однаковий потенціал і з'єднувати їх. В наведеній схемі це точка ***O*** та уявні точки *m* та ***b***, що є серединами ділянок ***MN*** та ***BC***. Опір ділянок ***Mm, mN, Bb*** та ***bC*** взяти по ***R/2***.

Але можна інакше підійти до розгляду цієї задачі. Уважно розглянемо точку ***O***. Вона є вузлом з'єднання шести провідників. Уявимо, що ці провідники з'єднані так, як показано на наступній схемі:



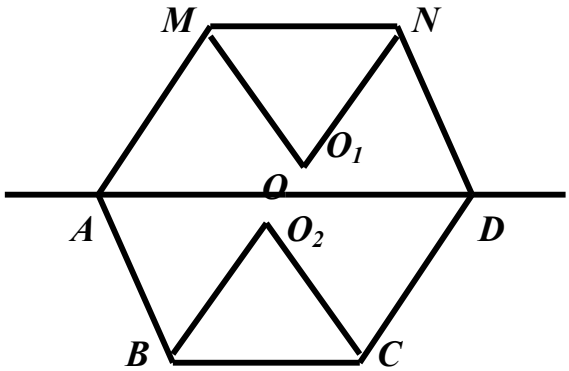
Тут ми уявно розділили точку ***O*** на три точки: O_1, ***O*** та O_2. При цьому ми не спотворили схеми. Точки O_1, ***O*** та O_2 мають однаковий потенціал. Отже спади напруги на ділянках O_1O та OO_2 будуть рівними нулеві. Їх можна не враховувати. Таким чином розглядувана в задачі схема набуде вигляду:

Маємо паралельне з'єднання трьох гілок (умовно: верхньої, середньої та нижньої):

$$1/R_x = 1/R_в + 1/R_c + 1/R_н$$

Опір середньої ділянки

$$R_c = R + R = 2R$$



Опір верхньої та нижньої ділянок однакові і рівні:

$$R_в = R_н = R + \frac{2}{3}R + R = \frac{8}{3}R$$

Отже: $$\frac{1}{R_x} = \frac{3}{8R} + \frac{1}{2R} + \frac{3}{8R} = \frac{10}{8R} = \frac{5}{4R}$$

$$R_x = \frac{4}{5}R$$

Студентам може бути запропоновано розв'язати дану задачу для випадків коли схема приєднана до джерела струму точками ***A*** та ***B***, або точками ***A*** та ***C***.

Практичне заняття № 11.

РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ - ЛЕНЦА.

Задачі, рекомендовані для розв'язку

в аудиторії: [6] 22.27, 22.35, 22,38, 22.42, [9] 18.50, 18.64.

дома: [5] 3.214, 3.216, 3.220 – 3.226, 3.229, 3.230.

Задача № 11.1.

На вході електричної схеми знаходиться свинцевий запобіжник перерізом $S_1 = 1мм^2$. Підвід до споживача зроблено мідним дротом з площею перерізу $S_2 = 3мм^2$. Система знаходиться при температурі $t_0^0 = 17^0 C$. На яке підвищення температури підвідних провідників розраховано цей запобіжник при короткому замиканні в споживачі, вважаючи, що внаслідок великої швидкості процесу при короткому замиканні енергія при нагріванні не розсіюється.

Розв`язок:

Запишемо кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання свинцевого запобіжника від $17^0 C$ до $t_{пл}^0 = 327^0 C$ і на плавлення його $(q = 2{,}26 \cdot 10^4\ Дж/кг)$.

$$Q_1 = c_1 m_1 \Delta t_1^0 + mq = \rho_1 l_1 S_1 \left(c_1 \Delta t_1^0 + q\right); \quad \Delta t_1^0 = t_{пл}^0 - t_0^0.$$

Кількість теплоти, яку одержить в ході цього процесу мідний дріт, знаходимо так:

$$Q_2 = m_2 c_2 \Delta t_2^0 = \rho_2 l_2 S_2 c_2 \Delta t_2^0;$$

де Δt_2^0 – підвищення температури мідного дроту.

Тепло, що виділяється в мідному і свинцевому провідниках, зумовлено проходженням електричного струму через них, і кількість теплоти цієї знаходиться так:

$$Q_1 = I_1^2 R_1 t; \qquad Q_2 = I_2^2 R_2 t;$$

де t – час, протягом якого протікав струм; $I_1 = I_2$ – так як провідники сполучені послідовно; R_1 і R_2 – опори відповідних провідників.

Тоді для визначення Δt_2^0 складемо співвідношення:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho'_1 l_1 S_2}{\rho'_2 l_2 S_1} = \frac{\rho_1 l_1 S_1 \left(c_1 \Delta t_1^0 + q\right)}{\rho_2 l_2 S_2 \left(\Delta t_2^0 c_2\right)};$$

Позначення: ρ_1 і ρ_2 – густини свинцю і міді, а ρ'_1 і ρ'_2 – їх питомі опори.

Тоді: $\frac{\rho'_1 S_2}{\rho'_2 S_1} = \frac{\rho_1 S_1 \left(c_1 \Delta t_1^0 + q\right)}{\rho_2 S_2 c_2 \Delta t_2^0}$. Звідки шукаємо величину Δt_2^0: $\Delta t_2^0 = \frac{\rho'_2 S_1^2 \rho_1 \left(c_1 \Delta t_1 + q\right)}{\rho'_1 S_2^2 \rho_2 c_2}$.

Підставивши табличні значення фізичних характеристик міді і свинцю і дані задачі, одержуємо:

$$\Delta t_2^0 \approx 1{,}8^0 C$$

Задача № 11.2.

Скільки електронів проходить за 1 с через поперечний переріз мідного дроту довжиною l =2м і площею поперечного перерізу S =0,4 мм^2, якщо при цьому на R_a розсіюється потужність P =0,35 Вт.

Розв`язок:

Скористаємось рівняннями законів Джоуля-Ленца і Ома в диференціальній формі:

$$w = jE = \sigma E^2 = \frac{Q}{Vt}.$$

Кількість електронів, які переносяться через поперечний переріз провідника за 1 с (одиницю часу), як відомо, знаходиться з значення сили струму:

$$I = \frac{q}{t}, \quad q = ne.$$

Тоді: $n = \frac{It}{e}$, де $I = jS$, а з $\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \sigma \vec{E}$;

$$n = \frac{\sigma E S t}{e}.$$

Запишемо значення напруженості поля з закону Джоуля-Ленца, використавши рівняння:

$$E = \sqrt{\frac{Q}{\sigma V t}} = \sqrt{\frac{\rho Q}{Vt}}.$$

Отже $$n = \frac{St}{\rho e}\sqrt{\frac{\rho Q}{Vt}} = \frac{t}{e}\sqrt{\frac{S^2 \rho Q}{Sl\rho^2 t}} = \frac{t}{e}\sqrt{\frac{SP}{l\rho}};$$

$$n = 1{,}27 \cdot 10^{19} (c^{-1}).$$

Задача № 11.3.

Який повинен бути опір обмотки підмагнічування гучномовця, щоб потужність струму підмагнічування становила P=8 Вт. Струм від акумулятора ЕРС=8 В поступає до гучномовця по лінії опором 1 Ом.

Розв`язок:

Позначимо шуканий опір R_x і запишемо вираз для визначення сили струму в колі: $I = \dfrac{\xi}{R + R_x}$.

Потужність, яка розвивається в котушці підмагнічування, можна виразити як:

$$P = I^2 R_x = \left(\frac{\xi}{R + R_x} \right)^2 R_x; \quad PR_x^2 + (2PR - \xi)^2 R_x + PR^2 = 0.$$

Розв`язок рівняння спрощується, якщо підставити дані з умови задачі:

$$R_x^2 - 6R_x + 1 = 0.$$

Одержуємо два розв`язки $R_{x1} = 5{,}8$ Ом ; $R_{x2} = 0{,}17$ Ом.

При аналізі розв`язків одержуємо:

а) в першому випадку струм в колі $I_1 = 1{,}17$ А і втрати потужності в підвідних провідниках лінії $P_1 = 1{,}37$ Вт ;

б) в другому випадку струм в колі $I_2 = 6{,}8$ А і втрати потужності в лінії $P_2 = 4{,}7$ Вт.

Таким чином, енергетично вигідне котушку підмагнічування гучномовця виготовити опором 5,8 Ом.

Задача № 11.4.

Сила струму в провіднику опором R =10 Ом протягом t =2 с зростає по лінійному закону від $I_0 = 0$ до $I_{\max} = 6$ А . Визначити кількість теплоти, що виділяється протягом першої і протягом другої секунд, а також співвідношення цих фізичних величин.

Розв`язок:

Скористаємось законом Джоуля-Ленца і запишемо: $Q = I^2 Rt$. При зміні сили струму в провіднику цей закон справджується для нескінченного малого проміжку часу:

$$dQ = I^2 Rdt,$$

де I є лінійною функцією часу $I = kt$,

k – коефіцієнт пропорційності при зміні струму протягом часу:

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta t}; \quad \Delta I = k\Delta t; \quad \text{а} \quad I = kt.$$

$$\text{Тоді:} \quad dQ = k^2 Rt^2 dt; \quad Q = k^2 R \int_{t_1}^{t_2} t^2 dt.$$

Щоб визначити кількість теплоти, яка виділяється протягом першої секунди, встановимо межі інтегрування $t_1 = 0$; $t_2 = 1$с :

$$Q_1 = \frac{1}{3}k^2 R\left(t_2^3 - t_1^3\right); \quad Q_1 = 120 \text{ (Дж.)}$$

Для визначення кількості теплоти, що виділяється протягом другої секунди, вибираємо $t_1 = 1;\ t_2 = 2$ с .

$$Q_2 = \frac{1}{3}k^2 R\left(t_2^3 - t_1^3\right); \quad Q_2 = 840 \text{ (Дж.)}$$

Співвідношення цих величин становить:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{840}{120} = 7.$$

Задача № 11.5.

Електрочайник має дві нагрівні спіралі. Якщо увімкнути першу, то вода закипає через $t_1 = 15$ *хвилин*, якщо увімкнути другу – через $t_2 = 30$ *хвилин*. Через який час закипить вода, якщо спіралі з'єднати послідовно, паралельно.

Розв`язок:

Для того, щоб вода закипіла потрібна однакова кількість теплоти, яка може бути обчислена за допомогою закону Джоуля-Ленца:

$$Q = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R}t$$

Враховуючи, що напруга в мережі залишатиметься сталою протягом всього часу, зручно скористатись останнім виразом. Тоді:

$$Q = \frac{U^2}{R_1}t_1 \qquad Q = \frac{U^2}{R_2}t_2 \quad ,$$

тут R_1 і R_2 – опори спіралей першого та другого нагрівників, t_1 і t_2 – час, протягом якого нагрівалась вода першим та другим нагрівниками.

Враховуючи, що $Q = const$ і $U = const$, отримаємо:

$$\frac{t_1}{R_1} = \frac{t_2}{R_2} \ (*)$$

Враховуючи, що $t_1 = 15$ *хв* $t_2 = 30$ *хв* , отримаємо $R_2 = 2R_1$.

Відповідно $R_{посл} = R_1 + R_2 = 3R_1$; а $R_{пар} = \frac{2}{3}R_1$ тому що $(1/R_{пар} = 1/R_1 + 1/R_2)$.

Скористаємось виразом (∗) для послідовного з'єднання спіралей:

$$t_{посл}/R_{посл} = \qquad t_{посл}/3R_1$$

$$t_{посл}/3R_1 = t_1/R_1$$

$$t_{посл} = 3\,t_1 = 45 \text{(хвилин)}$$

Аналогічно для паралельного з’єднання спіралей:

$$t_{пар}/R_{пар} = t_{пар}/\frac{2}{3}R_1$$

$$t_{пар}/\frac{2}{3}R_1 = t_1/R_1$$

$$t_{пар} = \frac{2}{3}\ t_1 = 10(хвилин)$$

Отже, при послідовному і паралельному з’єднанні спіралей вода закипатиме через 45 та 10 хвилин відповідно.

Практичне заняття № 12.

РОЗГАЛУЖЕНІ КОЛА. ПРАВИЛА КІРХГОФА.

Задачі, рекомендовані для розв’язку

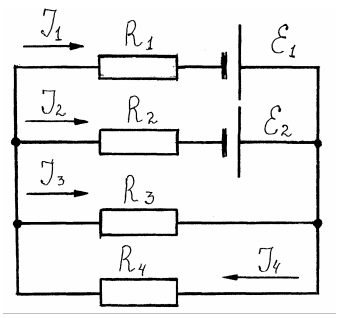
в аудиторії: [6] 22.65, 22.72, 22.76, 22.79, 22.85, 22.89.

дома: [5] 3.203, 3.206, 3.207, 3.211 – 3.213.

Задача № 12.1.

Визначити силу струму, що проходить через опори $R_1 = R_4 = 4Ом$, $R_2 = R_3 = 3Ом$, увімкнені в коло, як показано на малюнку, якщо $\xi_1 = 10В$, $\xi_2 = 4В$. Внутрішні опори $r_1 = 0{,}2Ом$, а $r_2 = 0{,}1Ом$.

Розв`язок:



Оскільки маємо розгалужене неоднорідне коло, використаємо правило Кірхгофа. За умовою необхідно визначити чотири струми, які протікають через відповідні опори. Слід скласти чотири рівняння.

Виберемо довільний напрям обходу контуру (за годинниковою стрілкою) довільний напрям струмів (нехай так, як показано на малюнку). За першим правилом Кірхгофа:

$$I_4 = I_1 + I_2 + I_3 \quad (*)$$

За другим правилом Кірхгофа:

$$\begin{cases} I_1R_1 + I_1r_1 - I_2R_2 - I_2r_2 = \xi_1 - \xi_2; \\ I_1R_1 + I_1r_1 - I_3R_3 = \xi_1; \\ I_3R_3 + I_4R_4 = 0. \end{cases} \qquad \begin{cases} I_1(R_1 - r_1) - I_2(R_2 + r_2) = \xi_1 - \xi_2; \\ I_1(R_1 - r_1) - I_3R_3 = \xi_1; \\ I_3R_3 + I_4R_4 = 0. \end{cases}$$

З рівнянь, складених за другим правилом Кірхгофа одержимо:

$$I_3 = -I_4 \frac{R_4}{R_3}; \quad I_2 = \frac{\xi_2 - I_4 R_4}{R_2 + r_2}; \quad I_1 = \frac{\xi_1 - I_4 R_4}{R_1 + r_1};$$

Таким чином, необхідно відшукати силу струму I_4, що зробимо підстановкою знайдених значень в правило вузлів (*):

$$\frac{\xi_1 - I_4 R_4}{R_1 + r_1} + \frac{\xi_2 - I_4 R_4}{R_2 + r_2} - I_4 \frac{R_4}{R_3} - I_4 = 0.$$

Звідси:

$$I_4 = \frac{\dfrac{\xi_1}{R_1 + r_1} + \dfrac{\xi_2}{R_2 + r_2}}{\dfrac{R_4}{R_1 + r_1} + \dfrac{R_4}{R_2 + r_2} + \dfrac{R_4}{R_3} + I}.$$

Подальше спрощення недоцільне. Підставивши числові значення, одержуємо:

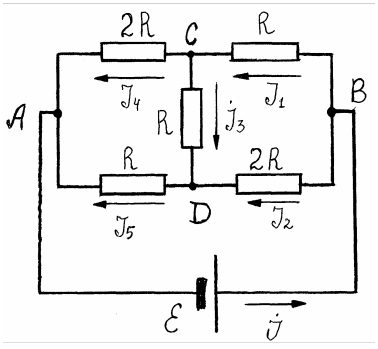
$$I_4 \approx 1{,}16 \text{ А}; \quad I_1 = 1{,}3 \text{ А}; \quad I_3 \approx -1{,}49 \text{ А}; \quad I_2 = 1{,}35 \text{ А}.$$

Задача № 12.2.

Визначити значення опору *R* між точками А і В кола, що складається з джерела ЕРС та п`яти провідників, які з`єднані так, як показано на малюнку.

Розв`язок:

Виберемо обхід контуру проти годинникової стрілки за напрямом струму *I*. Опір між точками АВ є фактично повним опором зовнішнього кола. Для його визначення необхідно знайти спад напруги на системі опорів або ЕРС, якщо внутрішнім опором джерела нехтувати, і загальну силу струму в колі. Для цього скористаємось правилами Кірхгофа. Згідно з першим правилом запишемо для вузлів В, С, Д:



$$I = I_1 + I_2;$$
$$I_1 = I_4 + I_3;$$
$$I_5 = I_3 + I_2;$$

Скориставшись другим правилом Кірхгофа, запишемо: для контуру ВСД:

$$RI_1 + I_3 R - 2I_2 R = 0;$$

для контуру АСД: $2RI_4 - I_5 R - I_3 R = 0$;

для контуру АДВЕ: $2RI_2 + I_5 R = \xi$.

При складанні останнього рівняння внутрішнім опором джерела ЕРС нехтуємо. З рівнянь другої групи знаходимо: $I_1 + I_3 = 2I_2$; $2I_4 = I_3 + I_5$

Співставивши ці записи з рівняннями для вузлів, запишемо:

$$\begin{cases} I_1 + I_3 = 2(I - I_1); \\ I_3 + I_5 = 2(I_2 - I_3); \\ I_1 + I_3 = 2(I_5 - I_3). \end{cases} \qquad \begin{cases} I_3 = 2I - 3I_1; \\ I_5 = 2I_1 - 3I_3; \\ I_1 = 2I_5 - 3I_3. \end{cases}$$

Підставимо третє рівняння в друге: $I_5 = 2(2I_5 - 3I_3) - 3I_2$;

$$I_5 = 4I_5 - 6I_3 - 3I_3;\quad 3I_5 = 9I_3;\quad I_5 = 3I_3;\quad I_1 = 6I_3 - 3I_3 = 3I_3;$$

$$2I = I_3 + 3I_1 = I_3 + 9I_3 = 10I_3;\quad I = 5I_5;\quad I_3 = \frac{1}{5}I;\quad 2I_2 = I_1 + I_3 = 4I_3;\quad I_2 = 2I_3.$$

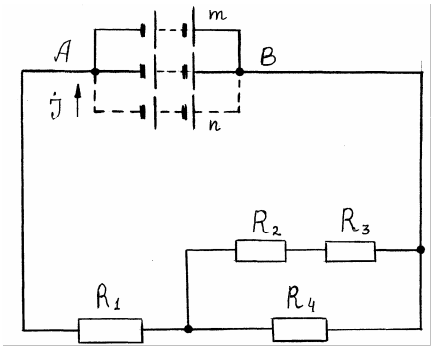
З цих рівнянь і розв`язків їх можна визначити значення струмів, що входять в рівняння $2I_2R + RI_5 = \xi$ через I: $I_2 = \frac{2}{5}I;\quad I_5 = \frac{3}{5}I.$ Тоді рівняння запишеться у вигляді: $\frac{4}{5}IR + \frac{3}{5}IR = \xi$, або $\frac{7}{5}IR = \xi.$ Сила струму в повному колі : $I = \frac{5\xi}{7R}$. Отже, опір між точками А і В: $R_\Sigma = \frac{7}{5}R.$

Задача № 12.3.

Визначити силу струму в колі, що складається з ***m*** послідовно з`єднаних джерел ЕРС в ***n*** паралельних вітках та зовнішнього опору змішаного з`єднання однакових провідників, як показано на малюнку. Задачу розв`язати при таких даних: ***ε****=1,1В;* ***n*** *= 4;* ***m*** *= 5;* $\boldsymbol{R_1}$ *= 1,5Ом;* ***r*** *= 0,2 Ом.*

Розв`язок:

Застосуємо закони Кірхгофа. Як видно з малюнка, електричне коло має два вузли.



За першим правилом Кірхгофа матимемо одне незалежне рівняння вузлів $I = I_1 \cdot n$, оскільки опір кожної паралельної ділянки однаковий ***mr***, то і струми замкнутого кола, в яке входить зовнішній сумарний опір (нехай ***R***) і одна з ділянок ЕРС між точками АВ, запишемо: $IR = I_1 rm = m\xi$,

$IR + \frac{Irm}{n} = m\xi$, $I(Rn + rm) = mn\xi$;

Представимо ***mn*** як суму всіх джерел ЕРС ***k=mn***. Тоді: $I = \frac{k\xi}{nR + mr}$

Загальний зовнішній опір ***R*** визначається за формулами паралельно-послідовного з`єднання: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4;\quad R = R_1 = R';\quad \frac{1}{R'} = \frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4};$

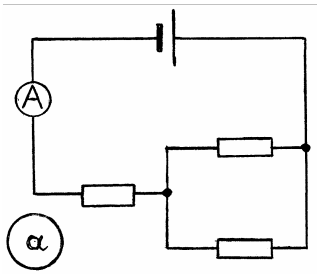
$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{2R_4} + \frac{1}{R_4} = \frac{3}{2R_4};\quad R' = \frac{2}{3}R_4 = \frac{2}{3}R_1;\quad R = R_1 + \frac{2}{3}R = \frac{5}{3}R_1;$$

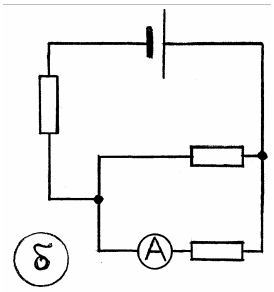
Отже : $I = \frac{3k\xi}{5(R_1 n + 3rm)};\quad I = \frac{3 \cdot 1{,}1 \cdot 20}{5(1{,}5 \cdot 4 + 3 \cdot 0{,}2)} = \frac{66}{30 + 3} = 2$ (А).

Задача № 12.4.

Накреслити схему електричного кола, що складається з опорів R_1 = 1,8 Ом R_2 =2,0 Ом R_3 =3,0 Ом і амперметра, опором якого можна нехтувати. ЕРС джерела 5,6 В, а внутрішній опір 0,5 Ом. Через амперметр протікає струм I=0,96 А.

Розв`язок:





Практично це є обернена або конструктивна, інженерна здача. А тому її розв`язок має базуватися на пошуках варіантів можливих схем повного кола, виходячи з закону Ома та розподілу струмів по ділянках в розгалужених колах. Таким чином можливі такі варіант кіл:

а) всі резистори ввімкнуті послідовно;

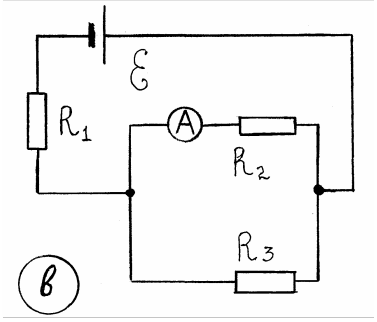
б) всі резистори ввімкнуті паралельно;

в) всі резистори ввімкнуті паралельно, а один послідовно;

в цьому випадку три варіанти:

1. R_1 послідовно, R_2 і R_3 паралельно;
2. R_2 послідовно, R_1 і R_3 паралельно або
3. R_3 послідовно, R_1 і R_2 паралельно.

(При цьому слід зауважити, що розміщення амперметра можливе в кожній з ділянок кола).



Проаналізуємо ці варіанти кіл:

а) $R_{зов} = 6{,}8$ Ом. $I = \dfrac{5{,}6}{6{,}8+0{,}5} \neq 0{,}96$ А.

б) $R_{зов} = 0{,}72$ Ом. $I = \dfrac{5{,}6}{0{,}72 \cdot 0{,}5} \neq 0{,}96$ (А).

в) Аналізуємо три можливі варіанти ввімкнення резисторів і розміщення амперметра.

Варіант схеми (а)

Послідовно ввімкнено R_1 , і R_3 – паралельно.

$$1)\, R_{зов} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3};\ I = \frac{5{,}6}{3+0{,}5} \neq 0{,}96\,(\text{А}).$$

$$2)\, R_{зов} = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3};\ I = \frac{5{,}6}{3{,}1+0{,}5} \neq 0{,}96\,(\text{А}).$$

$$3)\ R_{зов} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};\quad I = \frac{5{,}6}{3{,}95+0{,}5} \neq 0{,}96\ (\text{А}).$$

Варіанти схеми (б) , (в)

Конструктивної різниці в наведених схемах немає. Але покази амперметра, послідовно з яким ввімкнено амперметр, і величина опору резистора, який ввімкнений послідовно до розгалуження кола.

Проведемо розрахунок показів амперметра наприклад за схемою (в), при цьому пам`ятаючи, що її відмінність від схеми б чисто умовна і залежить від значення опору резисторів. Аналіз схеми і розв`язок задачі ідентичні.

Зробимо позначення резисторів довільним, нехай за схемою (в). Використаємо для розрахунку струму в колі результат аналізу варіанта (а).

$R_{зов}$ = 3 Ом. Тоді струм в колі I=1,6 А. Оскільки в розгалуженому колі струм розподіляється обернено пропорційно значенню опорів резисторів, то:

$\frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2}$, а $I_2 + I_3 = I$. Отже, $I_2 R_2 = I_3 R_3$ і $I_2 + I_3 = I$.

З цих двох рівнянь знайдемо I_2 , силу струму, що протікає через резистор R_2 і яку має фіксувати амперметр: $2I_2 = 3I_3$; $I_2 + I_3 = 1{,}6$

$$I_3 = \frac{2}{3} I_2 \; ; \quad I_2 \frac{2}{3} I_2 = 1{,}6 \quad I_2 = \frac{1{,}6 \cdot 3}{2} = 0{,}96 \text{ (А).}$$

Оскільки амперметр має обумовлені завданням покази, то і схема має бути саме такою, як зображено на схемі (в).

Розв`язати задачу з першої спроби допоміг звичайно вибір позначень опорів резисторів. В іншому разі спроб було б більше. Потрібно було б проаналізувати другий і третій випадки варіантів схеми.

Практичне заняття № 13.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ТІЛ.

Задачі, рекомендовані для розв’язку

в аудиторії: [6] 23.2 – 23.7, 23.15, 23.17.

дома: [6] 23.1, 23. 8, 23.9 – 23.14.

Задача № 13.1.

Визначити середню швидкість напрямленого руху електронів в мідному провіднику діаметром d =1,8 мм, якщо сила струму в ньому 10 А.

Розв’язок:

Для визначення середньої швидкості скористаємося формулою, що описує густину струму в металах: $j = n_0 e \vec{\upsilon}$; $j = \frac{I}{S}$; $n_0 = \frac{N_A}{V_0} = \frac{N_A}{A/\rho} = \frac{N_A \rho}{A}$.

Де V_0 – об`єм одного кіломоля металу. Тоді: $\frac{I}{S} = \frac{N_A \rho}{A} e \vec{\upsilon}$;

$$< \upsilon >= \frac{IA}{N_A \rho S e};\ < \upsilon >= 6 \cdot 10^3\ (м/с.)$$

Задача № 13.2.

Визначити величину заряду, який проходить через поперечний переріз срібного провідника $S = 9мм^2$ і довжиною l =50 м за час гальмування, якщо лінійна швидкість елементів обмотки котушки $\upsilon = 60\ м/с$.

Розв`язок:

Величина заряду визначається як $q = \int_0^t Idt$. При гальмуванні котушки на електрон діє сила інерції: $F_{in} = -m\frac{d\upsilon}{dt}$; де $\frac{d\upsilon}{dt}$ – лінійне прискорення срібної дротини. Так як сила інерції діє на заряджену частинку, вона є сторонньою силою. Напруженість сторонніх сил можна виразити як: $E_{ст} = \frac{F_{in}}{l} = -\frac{m}{l} \cdot \frac{d\upsilon}{dt}$; За означенням електрорушійна сила, що діє в котушці при гальмуванні:

$$\xi = \int_0^l E_{ст} dl = E_{ст} l = -\frac{m}{l} \cdot \frac{d\upsilon}{dt}.$$

l – довжина провідника. Зазначивши, що $I = \frac{\xi}{R}$; $R = \rho\frac{l}{S}$, запишемо: $Idt = q$;

$$q = -\frac{m}{l} \cdot \frac{l}{R} \int_{\upsilon_0}^{0} d\upsilon = -\frac{m}{l} \cdot \frac{lS}{\rho l} \int_{\upsilon_0}^{0} d\upsilon = -\frac{m}{l} \cdot \frac{S}{\rho} \int_{\upsilon_0}^{0} d\upsilon;\ q\text{=1,5(нКл)}.$$

Задача № 13.3.

Металевий диск радіусом R =10 см рівномірно обертається з частотою $\omega = 30\ об/с$. Визначити різницю потенціалів між центром і краєм диску.

Розв'язок:

При обертанні диску вільні електрони переміщуються від осі обертання до краю диску. Таке переміщення електронів триватиме до того часу, поки відцентрова сила не урівноважиться з силою електричної взаємодії:

$\frac{m\vec{\upsilon}^2}{R} = eE = e\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$; Шукана різниця потенціалів : $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{m}{e}\vec{\upsilon}^2$;

Враховуючи, що $\vec{\upsilon} = \omega R = 2\pi n R$, запишемо: $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{m}{e} \cdot 4\pi^2 n^2 R^2$;

$$\varphi_1 - \varphi_2 \approx 2 \cdot 10^{-9}\ (\text{В}).$$

Задача № 13.4.

Власна електропровідність чистого германію при 27^0C дорівнює $\sigma = 2{,}13 Ом^{-1} м^{-1}$. Рухливість електронів і дірок відповідно дорівнює $0{,}38\, м^2/(Вс)$ і $0{,}18\, м^2/(Вс)$. Визначити концентрацію носіїв струму та ширину забороненої зони. (Передекспоненційний множник $A = 2{,}4 \cdot 10^3 м^{-3}$).

Розв'язок:

У випадку власної електропровідності концентрація електронів і дірок германію однакова, а отже : $\sigma = en(U_n - U_p)$;

Звідси: $$n = \frac{\sigma}{e(U_n + U_p)} \approx 2{,}4 \cdot 10^{19}\,(м^{-3})$$

Для визначення ширини забороненої зони, або енергії активізації ΔE використаємо вираз: $n = A \cdot e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$; $\lg n = \lg A - \frac{\Delta E}{kT}\lg e$;

$$\Delta E = \frac{kT(\lg A - \lg n)}{0{,}43} \approx 1{,}15 \cdot 10^{-19}\,(\text{Дж}) \quad \Delta E = 0{,}72\,(\text{еВ}).$$

Практичне заняття № 14.

КОНТАКТНІ ЯВИЩА В МЕТАЛАХ ТА НАПІВПРОВІДНИКАХ

Задачі, рекомендовані для розв'язку

в аудиторії: [6] 24.3 – 23.6, 23.14.

дома: [9] 19.11 – 19.18.

Задача № 14.1.

Визначити контактну різницю потенціалів між міддю і платиною при ***T***=*800K*, якщо робота виходу електронів для міді ***A₁***= *4,272eB*, для платини ***A₂***= *6,275eB*. Стала термопари $\alpha = 7{,}5 \cdot 10^{-6}\ B/K$.

Розв'язок:

Оскільки в рівнянні по визначенню контактної різниці потенціалів переважна більшість параметрів є величинами табличними, в задачах практично розглядається залежність між різницею потенціалів, температурою і концентрацією електронів: $\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e}\ln\frac{n_1}{n_2}$;

Якщо відома стала термопари $\alpha = \frac{k}{l}\ln\frac{n_1}{n_2}$, то можна записати:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \alpha T$$

Таким чином, підставивши числові значення, зокрема роботу виходу в ***eB***, одержимо:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 1{,}809\ (B).$$

Задача № 14.2.

Визначити за допомогою термопари температуру муфельної печі, якщо другий спай термопари знаходиться при температурі $T_2 = 1800K$, стрілка гальванометра, що приєднано до термопари, відхилилась на $n = 25$ поділок. Стала термопари $\alpha = 0{,}5 \cdot 10^{-6}\ B/K$; внутрішній опір гальванометра $r = 2\text{кОм}$, а ціна поділки $i = 10^{-8}\ A$.

Розв'язок:

Термоелектрорушійна силу визначимо як: $\xi_T = \frac{k}{l} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_1 - T_2) = \alpha (T_1 - T_2)$.

Нехтуючи опором термопари і з'єднувальних провідників, можна записати $\xi_T = Ir$, або, враховуючи умову задачі: $inr = \alpha (T_1 - T_2)$, звідси :

$$T_1 = \frac{inr}{\alpha} + T_2\ , \quad T_1 \approx 1288\,\text{K}.$$

Задача № 14.3.

Термопара вісмут-залізо ($\alpha = 92 \cdot 10^{-6}\ B/K$) опором $R = 5\ Ом$ приєднана до гальванометра з внутрішнім опором $R_1 = 110\ Ом$. Яку силу струму покаже гальванометр, якщо один спай термопари поміщено в воду, що кипить, а другий в посудину Д'юара, в якому міститься суміш води і льоду.

Розв'язок:

Сила струму в розглядуваному колі може бути обчислена за законом Ома для повного кола:

$$I = \frac{\xi_T}{R + R_1}$$

Термоелектрорушійну силу визначимо як:

$$\xi_T = \alpha (T_2 - T_1).$$

тут T_2 – температура води, що кипить ($T_2 = 373\ K$),

а T_1 – температура суміші води і льоду ($T_1 = 273\ K$).

Таким чином: $$I = \frac{\alpha(T_2 - T_1)}{R + R_1} = \frac{92 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{110 + 5} = 80 \cdot 10^{-6}\,(A)$$

Практичне заняття № 14.

КОНТАКТНІ ЯВИЩА В МЕТАЛАХ ТА НАПІВПРОВІДНИКАХ

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 24.3 – 23.6, 23.14.
дома: [9] 19.11 – 19.18.

Задача № 14.1.
Визначити контактну різницю потенціалів між міддю і платиною при $T=800K$, якщо робота виходу електронів для міді $A_1 = 4{,}272eB$, для платини $A_2 = 6{,}275eB$. Стала термопари $\alpha = 7{,}5 \cdot 10^{-6}\ B/K$.

Розв'язок:

Оскільки в рівнянні по визначенню контактної різниці потенціалів переважна більшість параметрів є величинами табличними, в задачах практично розглядається залежність між різницею потенціалів, температурою і концентрацією електронів: $$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e}\ln\frac{n_1}{n_2};$$

Якщо відома стала термопари $\alpha = \frac{k}{l}\ln\frac{n_1}{n_2}$, то можна записати:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \alpha T$$

Таким чином, підставивши числові значення, зокрема роботу виходу в eB, одержимо:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 1{,}809\ (B).$$

Задача № 14.2.
Визначити за допомогою термопари температуру муфельної печі, якщо другий спай термопари знаходиться при температурі $T_2=1800K$, стрілка гальванометра, що приєднано до термопари, відхилилась на n=25 поділок. Стала термопари $\alpha = 0{,}5 \cdot 10^{-6}\ B/K$; внутрішній опір гальванометра r= 2*кОм,* а ціна поділки $i = 10^{-8}\ A$.

Розв'язок:

Термоелектрорушійна силу визначимо як: $\xi_T = \frac{k}{l}\ln\frac{n_1}{n_2}(T_1 - T_2) = \alpha(T_1 - T_2)$.

Нехтуючи опором термопари і з'єднувальних провідників, можна записати $\xi_T = Ir$, або, враховуючи умову задачі: $inr = \alpha(T_1 - T_2)$, звідси :

$$T_1 = \frac{inr}{\alpha} + T_2 \ , \quad T_1 \approx 1288\,\text{K}.$$

Задача № 14.3.

Термопара вісмут-залізо ($\boldsymbol{\alpha}$*=92·10^{-6} В/К*) опором ***R****=5 Ом* приєднана до гальванометра з внутрішнім опором $\boldsymbol{R_1}$*=110 Ом*. Яку силу струму покаже гальванометр, якщо один спай термопари поміщено в воду, що кипить, а другий в посудину Д'юара, в якому міститься суміш води і льоду.

Розв'язок:

Сила струму в розглядуваному колі може бути обчислена за законом Ома для повного кола:

$$I = \frac{\xi_T}{R + R_1}$$

Термоелектрорушійну силу визначимо як:

$$\xi_T = \alpha(T_2 - T_1).$$

тут $\boldsymbol{T_2}$ – температура води, що кипить ($\boldsymbol{T_2}$ *= 373 К*),
а $\boldsymbol{T_1}$ – температура суміші води і льоду ($\boldsymbol{T_1}$ *= 273 К*).

Таким чином: $I = \frac{\alpha(T_2 - T_1)}{R + R_1} = \frac{92\cdot10^{-6}\cdot100}{110+5} = 80\cdot10^{-6}\,(A)$

Практичне заняття № 15.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ, ГАЗАХ, ВАКУУМІ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 25.4, 25.15, 26.4, 26.7, 26.9, 27.4, 27.13.

дома: [5] 3.232, 3.233, 3.245 – 3.252.

Задача № 15.1.
Визначити електропровідність розчину кухонної солі, якщо при розчиненні m=2,92 г солі в 1 л води 44% молекул солі дисоціювали на іони. Рухливість іонів $U_+ = 45 \cdot 10^{-9}\ мг/(Вс)$, $U_- = 68 \cdot 10^{-9}\ мг/(Вс)$.

Розв'язок:
Провідність електроліту визначимо за формулою:

$$\sigma = \alpha enz\left(U_+ + U_-\right) = \alpha \frac{mA}{\mu V} e\left(U_+ + U_-\right) \approx 0{,}23 Ом^{-1} м^{-1}.$$

Задача № 15.2.
При протіканні струму через розчин мідного купоросу на електроді площею S=9,65 см^2, при густині $j = 0{,}02 A \cdot см^2$, виділяється m=38,4 мг міді. Визначити час проходження струму.

Розв'язок:

Для визначення часу проходження струму через електроліт користаємось законом Фарадея: $m = kIt.$, звідки : $t = \frac{m}{kI}$.

Так як $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}$, а I можна представити як jS, запишемо: $t = \frac{mFn}{AjS}$,

де , F – число Фарадея, n=2 – валентність міді, A=64 – маса одного кілограм-еквівалента речовини.
Підставимо числові значення в одержану формулу і отримаємо:

$$t = \frac{0{,}6 \cdot 10}{10^{-2}} = 0{,}6 \cdot 10^3 \text{(с)} = 10 \text{ хв.}$$

Задача № 15.3.
Через підкислену воду протягом t=1 хв пропускають струм силою I=1А. Який об'єм займе при нормальних умовах гримучий газ, який при цьому виділиться?

Розв'язок:
Об'єм гримучого газу V дорівнює сумі об'ємів водню V_1 кисню V_2, який виділяється при електролізі, тобто $V = V_1 + V_2$. Об'єм водню знайдемо з залежності:

$$V_1 = \frac{m_1}{D_1} = \frac{m_1 \mu_1}{V_\mu},$$

де V_μ – об'єм грам-молекули, D_1 – густина водню, μ_1 – маса однієї грам-молекули водню, при нормальних умовах.

Аналогічно знаходимо: $V_2 = \frac{m_2 \mu_2}{V_\mu}$.

Масу водню m_1, яка виділяється під час електролізу, визначаємо за законом Фарадея: $m_1 = \frac{A_1 It}{F \cdot Z_1}$; $m_2 = \frac{A_2 It}{FZ_2}$;

де A_1, A_2, Z_1 і Z_2 – відповідно: атомна вага і валентність водню і кисню. Звідси:

$$V = \frac{ItV_\mu}{F}\left(\frac{A_1}{Z_1\mu_1} \cdot \frac{A_2}{Z_2\mu_2}\right) \approx 10{,}5 \cdot 10^{-6}(м^3).$$

Задача № 15.4.

У скільки разів збільшиться струм насичення термоелектронної емісії при торіюванні вольфрамового катода при робочій температурі Т=1860 К, якщо емісійна стала і робота виходу чистого і торійованого вольфраму відповідно дорівнюють $B_1 = 6{,}0 \cdot 10^5 AK^{-2}м^{-1}$; $A_1 = 4{,}54eB$; $B_2 = 0{,}3 \cdot 10^5 AK^{-2}м^{-2}$; $A_2 = 2{,}63eB$.

Розв'язок:

Ця задача в певній мірі описує процес в вакуумі, але основним є заміна густини струму від зовнішніх умов. Густина струму насичення при 1800 К при термоелектронній емісії з чистого вольфраму: $j_1 = B_1 T^2 e^{-\frac{A_1}{kT}}$.

Густина струму з торійованого вольфрамового катоду: $j_2 = B_2 T^2 e^{-\frac{A_2}{kT}}$

Збільшення струму насичення визначається, як:

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{B_2}{B_1} e^{-\frac{A_2 - A_1}{kT}} = \frac{B_2}{B_1} e^{\frac{A_1 - A_2}{kT}}; \quad \frac{j_2}{j_1} \approx 1{,}1 \cdot 10^4.$$

Задача № 15.5.

Між пластинами конденсатора, площею 250 см^2 кожна, знаходиться 375 см^3 водню. Концентрація іонів в газі $5{,}3 \cdot 10^7 см^{-3}$. Яку напругу потрібно прикласти до конденсатора, щоб викликати струм силою 2 мкА? Рухливість іонів $U_+ = 5{,}4 см^2/(Вс)$ і $U_- = 7{,}4 см/(Вс)$.

Розв'язок:

Напруга ***U*** на пластинах конденсатора зв'язана з напруженістю електричного поля співвідношенням:

$$\boldsymbol{U = -Ed}.$$

Напруженість поля можна відшукати, знаючи густину струму в газі:

$$j = \sigma E = q_0 n_0 (U_+ + U_-) E;$$

$$E = \frac{I}{Sqn_0 (U_+ + U_-)}.$$

Тоді, $U = \frac{IV}{qn_0 (U_+ - U_-) \cdot S} \approx 110$ (В).

Задача № 15.6.

В плоскому повітряному конденсаторі з площею пластин S=100 см^2 кожна і відстанню між ними d=5см при іонізації рентгенівськими променями протікає струм насичення $I_H = 10^{-7}$ А. Визначити максимально можливе число іонів в 1 см^3, якщо іони одновалентні.

Розв'язок:

Найбільше можливе число пар іонів, що утворюється в одиниці об'єму, визначається за формулою:

$$n_0 = \sqrt{\frac{N}{\gamma}}.$$

де N – число пар іонів, що утворюється в одиниці об'єму за 1 с. Коефіцієнт дисоціації при нормальних умовах: $\gamma = 1{,}67 \cdot 10^{-12} c^{-1}$. Отже, для розв'язку задачі потрібно визначити N: $N = \frac{I_H}{qdS} \approx 1{,}25 \cdot 10^{15} (м^{-3} c^{-1})$.

Таким чином: $n_0 = \sqrt{\frac{I_H}{qdS\gamma}} = \sqrt{\frac{10^{28}}{18{,}4}} = 2{,}7 \cdot 10^3 (м^{-3})$.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО Розв'язування НА ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

1. Електричний струм передається на відстань *600 м* по двопровідній лінії з мідних провідників перерізом *10 мм*^{2}. Напруга на початку лінії *240 В*, струм у лінії *18 А*. Знайти напругу на кінці лінії і втрату напруги в відсотках від номінальної напруги *220 В*. (203, 3 В; 17%)

2. Знайти невідомий опір по показах амперметра і вольтметра, якщо ***U**=1 В*, ***I**=5×10*$^{-3}$*А*. Внутрішній опір вольтметра *600 Ом*. (300 Ом).

3. Визначити густину струму в залізному провіднику довжиною *10 м*, якщо провідник знаходиться під напругою *6 В*. (6,9 10^6 А/м^2).

4. Електрон в атомі водню обертається навколо ядра по коловій орбіті радіусом $5{,}3\times10^{-11}$ *м*. Визначити, який струм він створює. ($1{,}1\times10^{-8}$ А).

5. Який заряд пройде по провіднику, якщо сила струму рівномірно зменшується від *5 А* до нуля протягом *10 секунд*?

6. До амперметра, опір якого *0,27 Ом*, підключено паралельно шунт опором *0,09 Ом*. Обчислити силу струму в колі, якщо амперметр показує *2 А*.

(8 А)

7. Пластинки плоского конденсатора приєднані до джерела постійної напруги *300 В*. Пластинки наближаються з швидкістю 10^{-3} *м/с*. Який струм іде по підвідним провідникам в той момент, коли пластинки знаходяться на відстані 2×10^{-3} *м* одна від одної. Площа пластинок $S=0{,}04$ *м*^{2}.

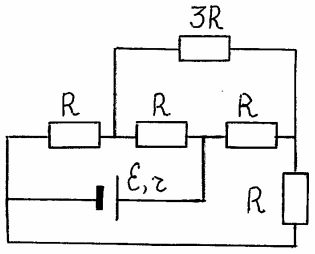
($2{,}65\times10^{-8}$ А).

8. До конденсатора ($C=10$ *мкФ*) через опір приєднаний акумулятор, ЕРС якого *2 В*. Через скільки часу конденсатор зарядиться до напруги *1,98 В*? Опір акумулятора незначний. (2×10^{-4} с).

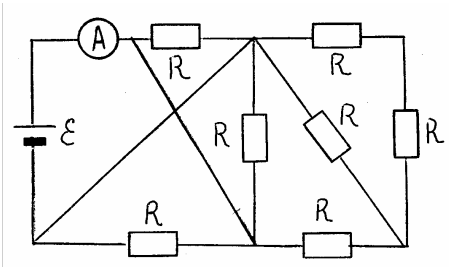
9. Скільки витків нікелінового провідника діаметром *0,5 мм* треба намотати на циліндр радіусом *1,5 см*, щоб виготовити нагрівальний прилад, який має опір *48 Ом*. Питомий опір нікеліну становить $0{,}4\cdot10^{-6}$ *Ом·м*.

(400 витків).

Визначити загальний опір кола.
Визначити силу струму, що
Протікає через провідник опором 3*R*



10.



Яку силу струму покаже амперметр, якщо його увімкнути, як показано на рисунку. R = 10 Ом, а напруга на затискачах джерел U=1,5 В.

(0,54 А).

11. При під'єднанні до джерел споживача опором *4,5 Ом* сила струму в колі дорівнює *0,2 А*. При приєднанні до цього ж джерела споживача опором *10 Ом*,

сила струму в колі створює *0,1 А*. Визначити ЕРС джерела та його внутрішній опір.

12. ЕРС джерела струм *10 В*. Коли до нього приєднали споживач опором *2 Ом*, струм в колі становить *4 А*. Визначити струм короткого замикання.
(20 А)

13. Визначити, який потрібний додатковий опір до вольтметра з межею вимірювання *3 В*, щоб виміряти напругу до *30 В*, якщо опір вольтметра *600 Ом*.

14. Котушка реле розрахована на *110 В* і на потужність *2,5 Вт*. Який по значенню опір потрібно ввімкнути в коло, щоб використовувати реле в мережі *220 В*? Накреслити схему під'єднання. (4,84 кОм)

15. Генератор ЕРС *140 В* з внутрішнім опором *0,2 Ом* дає струм *400 А*. Опір зовнішнього кола *1,2 Ом*. Визначити повну корисну потужність генератора, втрати потужності і ККД. (14 кВт; 12 кВт; 2 кВт; 86%)

16. Два джерела з ЕРС *4 В* і *6 В*, з однаковими внутрішніми опорами $r_1 = r_2 = 1Ом$ з'єднані послідовно і зустрічно. Вони замикаються на резисторі ***R***. При якому значенні на ньому буде виділятися максимальна теплова потужність? Яка величина цієї потужності. (*За законом Джоуля-Ленца* $P=I^2R$. *За законом Ома* $I = \frac{\varepsilon_\Sigma}{R + r_\Sigma}$ *- індекс, що вказує сумарне значення величин для цього кола, тобто* $r_\Sigma = 2r$, *а* $\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_1 \pm \varepsilon_2$, *але оскільки вмикання джерел зустрічне, то* $\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$).

17. Скільки потрібно однакових акумуляторів, ЕРС яких *1,25 В* і внутрішній опір кожного *0,004 Ом*, щоб скласти батарею і одержати на затискачах *115 В* і силу струму в колі *25 А*.

18. Джерело струму замкнуте на зовнішній опір R_1 *к.к.д*. джерела становить *50%*. В скільки разів зміниться *к.к.д.* джерела струму, якщо опір збільшиться в 4 рази? ($\frac{\eta_2}{\eta_1} = 1{,}6$)

19. Елемент з ЕРС *2 В* і внутрішнім опором *0,5 Ом* включено в коло послідовного з амперметром, який показує силу струму *0,8 А*. З яким *к.к.д*. робить елемент?
(80%)

20. Елемент, ЕРС якого ε і внутрішній r, замкнуто на зовнішній опір R. Найбільша потужність у зовнішньому колі дорівнює *9 Вт*. Сила струму при цих умовах у колі дорівнює *3 А*. Знайти величину ε і r. (6 В, 1 Ом)

21. Акумулятор з ЕРС *1,2 В* заряджається силою струму *1 А*. Визначити роботу електричних сил і кількість теплоти, яка виділяється щосекунди, якщо різниця потенціалів на затискачах акумулятора ***U****=1,8 В.*

(*A*=1,8 Дж; *Q*=0,6 Дж)

22. Батарея акумуляторів із ЕРС *12 В* розряджається при прузі *12,5 В* струмом *3 А*. Вважаючи, що акумулятор віддає *k=70%* електричного заряду, визначити к.к.д. η акумулятора:

а) при розряді струмом I_2=3 А ($\eta = k\frac{\varepsilon(I_1 + I_2) - UI_2}{UI_1}$)

б) при розряді струмом I_3=0,3 А ($\eta = k\frac{\varepsilon(I_1 + I_3) - UI_3}{UI_1}$)

23. Вольтметр при розімкненому колі показує *6 В*, а при замкненому - *5 В*. Амперметр при замкненому колі показує *3 А*. Знайти ЕРС джерела; потужність, яку передають споживчу; втрату потужності в середині джерела; к.к.д. джерела.

(*P'*=3Вт; P_k=15Вт; ε=3Вт; η=83,4 %)

24. Знайти величину струму в обмотці тролейбусного двигуна, що розвиває силу тяги *6000 Н* при напрузі у мережі *600 В* і швидкість руху *54 км/год*., к.к.д. двигуна *80%*. (187,5 А)

25. Генератор постійного струму розвиває ЕРС *150 В* і створює в зовнішньому колі струму *30А* Визначити потужність, яка віддається споживачу; потужність, яку розвиває генератор; потужність втрат в середині джерела і к.к.д. джерела, якщо внутрішній опір *0,6 Ом*.

(4500 Вт; 3,96 кВт; 88%)

26. При напрузі *220 В* електрична праска споживає потужність *400 Вт*. Визначити опір нагрівного елемента і величину струму, що проходить крізь нього.

(R = 121 Ом; I ≈ 1,8 А.)

27. Електричний чайник має два нагрівних елементи. При виключенні одного з них вода закипає через 7 хв., при включенні другого - через 15 хв. Через скільки хвилин закипить вода, якщо обидва елементи включити: а)послідовно, б) паралельно.

28. Скільки витків нікелевого дроту потрібно навити на фарфоровий циліндр діаметром *2 см*, щоб зробити кип'ятильник, яким протягом *10 хв*. можна закип'ятити *120 г* води при початковій температурі 10^0*С, к.к.д.* прийняти *60%*. Діаметр провідника *d - 0,2 мм*. Напруга живлення - *100 В*.

(*N* - 133 витки)

29. Сила струму у провіднику опором *100 Ом* рівномірно збільшується від нуля до *10 А* протягом часу *30 сек*. Визначити кількість теплоти, яка виділялася протягом цього часу в провіднику. (Q - 100 кДж)

30. Якщо напруга у колі дорівнює U_1= *120 В*, то вода в електричному чайнику закипає τ_1= *20 хв*. Якщо напруга в колі рівна U_2= *11 В*, то при такій же початковій температурі вода закипає через τ_2= *28 хв*. Для простоти взяти, що втрата тепла від чайника оточуючому середовищу пропорційна часу нагрівання. Обчислити, через який час τ_3 закипить вода чайнику при напрузі в колі U_3= *100 В*. (τ_3 - 2640 с.)

31. До кінця свинцевого провідника довжиною $l=5\cdot10^{-2}$*м* і діаметром $d=0{,}2\cdot10^{-3}$*м* прикладається напруга *U=100 В*. Який проміжок часу τ пройде до того моменту, як провідник почне плавитись? Температура плавлення свинцю $T=327^0C$. Втрати теплоти в зовнішній простір знехтувати. Прийняти початкову температуру провідника $T_0=0^0C$. Знехтувати зміною теплоємності при нагріванні;

32. Яка потужність виділяється в одиниці об`єму провідника довжиною *l=1м*, якщо при густині струму $j=10^6$ *А/м*^{2} на його кінцях підтримується різниця потенціалів *U=1 В*. Який питомий опір провідника?
(W = 10^6 Вт/м^3 ; ρ= 10^{-6} Ом м).

33. Різниця потенціалів між кінцями резистора, по якому йде струм силою *I=0,5 А* дорівнює $\varphi_1-\varphi_2$=*2 В*. Визначити роботу електричних сил і кількість тепла, що виділяється за одну секунду. (А = 1 Дж).

34. Визначити, на скільки зросла температура мідного провідника площею поперечного перерізу *5 мм*^{2}, якщо розплавився свинцевий запобіжник площею поперечного перерізу *4 мм*^{2}. Початкова температура 17^0C. Втратами на теплопровідність можна знехтувати. (T= 10^0 С).

35. Електричний стерилізатор, що має дві обмотки, ввімкнутий в мережу *220В*. При вмиканні однієї обмотки вода закипає через *15 хв*., а при вмиканні другої - через *30 хв*. Через який час закипить вода, якщо ввімкнути обидві обмотки: а) послідовно; б) паралельно.
(2,7 10^3 с; 6 10^2 с).

36. Під час електролізу води через ванну протягом *20 хв*. проходить струм *20А*. Визначити температуру виділеного кисню, якщо він має об`єм *0,5 л*, при тиску $2\cdot10^5$ *Па*. (387 К).

37. При нікелюванні через електролітичну ванну протягом *5 хв*. Протікає струм *3,2 А*. Скільки іонів трьохвалентного нікелю нейтралізується на катоді за цей час ? ($2\ 10^{21}$).

38. Визначити товщину шару міді при електролізі на плоскому електроді протягом *10 хв.* при струмі *0,5 А*, якщо площа пластини *25 см*^{2}.

39. Атомна маса золота *197,2*, валентність *3*. Обчислити електрохімічний еквівалент золота.

40. Кількість теплоти, яку повинна віддавати електропіч за *20 хвилин* дорівнює $2{\cdot}10^5$ *Дж*. Якою повинна бути довжина ніхромової дротини спіралі, якщо площа перерізу $115{\cdot}10^{-7}$ *м*^{2}, а нагрівний елемент розрахований на напругу *36 В* ?

41. Шкала мікроамперметра з внутрішнім опором *10 Ом* має *100* поділок при ціні поділки *10 мкА*. Знайти опір шунта, який необхідно приєднати до приладу, щоб можна було виміряти струм до *1 А*. ($R=10^{-2}$ Ом).

42. Дві батареї з ЕРС $\varepsilon_1=12$ *В*, $\varepsilon_2=6$ *В* і внутрішнім опором $r_1=r_2=1$ *Ом* підключені паралельно. Який опір повинна мати лампочка, під'єднана до батареї, при умові її максимальної потужності. (R=2/3 Ом).

43. Батарея із $N=900$ елементів ввімкнута в коло з зовнішнім опором $R=10$ *Ом* таким чином, що n_1 паралельно з`єднаних елементів $n_2$ мають послідовно з`єднаних, і в колі тече максимальний струм. Визначити n_1, n_2 і максимальну силу струму в опорі R, якщо ЕРС елемента $\varepsilon=2$ *В*, а внутрішній опір $r=0,1$ *Ом*.

44. Маємо n однакових джерел з ЕРС і внутрішнім опором r. Визначити, в якому випадку вигідно включати джерела послідовно, а в якому - паралельно, якщо опір зовнішнього кола дорівнює R .

$$(R << r/n, \frac{I_{\bullet єр}}{I_{\bullet „_}} = n) \quad (R >> rn, \frac{I_{\bullet єр}}{I_{\bullet „_}} = \frac{1}{n})$$

45. Площа поперечного перерізу залізного провідника *1 мм*^{2}, а сила струму в ньому *10 А*. Визначити середню швидкість напрямленого руху електронів, вважаючи, що число вільних електронів в одиниці об`єму дорівнює числу атомів в одиниці об`єму провідника. ($7,4{\cdot}10^{-4}$ м/с).

46. Визначити сумарний імпульс електронів провідності в прямому провіднику довжиною $1,2{\cdot}10^4$ *м*, по якому тече струм *300А*. ($2{\cdot}10^{-4}$ Н/м^2).

47. Визначити середню швидкість впорядкованого руху вільних електронів в металевому провіднику перерізом *4 мм*^{2}, по якому проходить струм силою *0,8А*. Число вільних електронів в одиниці об`єму рівне *2,5·10*^{22} *см*^{3}.
($0{,}5\cdot10^{-4}$ м/с).

48. До кінців залізного провідника довжиною *1м* і радіусом *0,5мм* прикладена напруга *12В*. Визначити густину струму та число електронів, які проходять поперечний переріз провідника за *1 сек*. ($1{,}3\cdot10^{8}$ А/м^2; $1{,}2\cdot10^{24}$ м$^{-2}$).

49. Визначити концентрацію вільних електронів в металевому провіднику площею поперечного перерізу *2мм*^{2}, якщо відомо, що середня швидкість напрямленого руху електронів *9,3·10*$^{-4}$ *м/сек*. при силі струму *8А*.
($2{,}86\cdot10^{28}$ м$^{-3}$).

50. Визначити, який струм іде по мідному провіднику довжиною *2·10*^{4} *м*, якщо сумарний імпульс електронів *10*$^{-5}$ *кг м/с*. (7,6 А.)

51. Металевий диск рівномірно обертається з частотою *50 об/с*. Визначити різницю потенціалів між центром і краями диска, якщо його радіус *5 см*.
($1{,}4\cdot10^{-7}$ В)

52. Визначити концентрацію електронів провідності в міді, якщо густина міді рівна *8,93·10*^{3} *кг/м*^{3}. ($8{,}5\cdot10^{28}$ м^3).

53. Виходячи з положення класичної електронної теорії металів, визначити питомий опір золота, використовуючи такі дані: питомий опір міді рівний *1,7·10*$^{-8}$ *Ом·м*, питома теплопровідність золота і міді рівна відповідно *2,9·10*^{4} *Вт/м К і 3,8·10*^{4} *Вт/м К*. ($2{,}3\cdot10^{-3}$ Ом м).

54. На аноді електронної лампи за рахунок кінетичної енергії електронів, що долітають від катода, виділяється кількість теплоти *16,3 Дж* за *20 хв*. Яка середня швидкість електронів в лампі, якщо сила струму в анодному колі *6·10*$^{-3}$ *А*. ($8{,}9\cdot10^{5}$ м/с).

55. Потенціал іонізації атома ртуті *10,4 еВ*. Яку найменшу швидкість повинен мати електрон, щоб іонізувати атом ртуті при ударі?

56. По провіднику, площа перерізу якого *1,5мм*^{2} проходить струм *0,3А*. Вважаючи, що концентрація вільних електронів у речовині *10*^{18}*м*$^{-3}$, визначити швидкість напрямленого руху електронів.

57. Провідник і напівпровідник з`єднані паралельно. При певній напрузі покази обох амперметрів однакові. Чи збережеться рівність показів амперметрів, якщо збільшити напругу джерела струму? (Покази в колі напівпровідника будуть більші).

58. Провідник і напівпровідник з`єднані послідовно і до них прикладено таку напругу, що покази вольтметрів однакові. Чи збережеться ця напруга, якщо збільшити напругу джерела струму? ($U_{пров.} > U_{напівпров.}$)

59. Чи збільшиться провідність чистого напівпровідника шириною забороненої зони *0,9 еВ*, якщо подіяти на нього при кімнатній температурі випромінюванням з довжиною хвилі 1 *мкм* ? (Да, E_v= 1,2 еВ).

60. Визначити питомий опір власного напівпровідника (германія), якщо концентрація дірок $2{,}5 \cdot 10^{13} м^{-3}$, рухливість електронів $0{,}36 м^2/В \cdot с$, рухливість дірок $0{,}16\ м^2/В \cdot с$. (ρ=0,48·10^6 Ом м).

61. В досліджуваному напівпровіднику у даних вимірювання ефекту Холла концентрація електронів при *400К* - $6{,}2 \cdot 10^{15} см^{-3}$. Знайти ширину забороненої зони матеріалу, вважаючи, що вона змінюється з температурою по лінійному закону. (ΔE=1,27 еВ).

62. Визначити електронну та провідність легованого кремнію ***р*** - типу, а також його опір, якщо відомо лінійні розміри зразка: довжина *5 мм*, ширина *2 мм* і товщина *1 мм*; рухливість електронів $0{,}12\ м^2/В \cdot с$, дірок - $0{,}025\ м^2/В \cdot с$; концентрація вільних носіїв $2{,}5 \cdot 10^{16} м^{-3}$. На $7{,}1 \cdot 10^7$ атомів кремнію припадає *1* атом акцептора.

(σ_e=4,8·10^{-4} Ом$^{-1}$ м$^{-1}$; σ_p=2,9·10^{-11} Ом$^{-1}$м$^{-1}$).

МОДУЛЬ № 3 “ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ“

ПОРАДИ ДО РОЗВ`ЯЗКУ ЗАДАЧ З ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ.

За теорією близькодії взаємодія зарядів здійснюється через електричне поле і описується законом Кулона. Проте характер взаємодії рухомих зарядів складніший, тому що при русі заряджених частинок виникає їх нова якість. Вони набувають магнітних властивостей, і виникає специфічна форма матеріальної взаємодії рухомих зарядів, яка має назву ***магнетизм***.

Передача магнітної взаємодії на відстань здійснюється особливим матеріальним носієм – ***магнітним полем***.

Завданням даного розділу практикуму є визначення основних силових і енергетичних параметрів магнітного поля *індукції* $\vec{B}$, *напруженості* $\vec{H}$, *магнітного потоку* Φ та встановлення взаємозв'язку і характеру взаємодії магнітного поля з рухомими зарядами (струмами) в залежності від середовища, в якому відбувається взаємодія.

Характер поля того самого електричного заряду залежить від того. в якій системі відліку ми розглядаємо процес, у рухомій чи нерухомій відносно даного заряду.

Для кількісної характеристики магнітного поля використовується фізична величина, яка називається *індукцією магнітного поля* або *вектором індукції* $\vec{B}$. Вектор $\vec{B}$ напрямлений вздовж прямої, що співпадає з напрямом магнітного поля і утворює з векторами I$d\vec{l}$, $d\vec{F}$ правогвинтову трійку векторів. Індукція магнітного поля є силовою характеристикою і враховує також матеріальні властивості середовища, в якому існує магнітне поле.

Як силова характеристика магнітного поля у вакуумі використовується вектор $\vec{H}$, який називається напруженістю магнітного поля. Вектори $\vec{B}$ і $\vec{H}$ зв'язані між собою співвідношенням $\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$.

Зручним для визначення напрямку векторів $\vec{B}$ і $\vec{H}$ є правило свердлика, за яким поступальний правогвинтовий рух свердлика співпадає з напрямком струму, а напрям магнітного поля співпадає з рухом кінця ручки свердлика, тобто вектори $\vec{B}$ і $\vec{H}$ є дотичними до кола, що описують кінці ручки свердлика.

Типові задачі, що враховують процеси в магнітному полі, можна об`єднати в такі групи:

- Обчислення параметрів, як характеризують магнітне поле, створене постійними магнітами, або постійним струмом в провідниках довільної форми.
- Визначення параметрів процесу взаємодії магнітного поля з рухомими зарядженими частинками.
- Розрахунок силових та енергетичних закономірностей взаємодії провідників зі струмом довільної форми з магнітним полем.

Взаємодія магнітних полів.

При розв'язуванні задач, що віднесені до першої групи, слід зауважити, що обчислення параметрів магнітного поля в основному будується на законі Біо-Савара-Лапласа. Задачі можуть бути прямими і оберненими, де необхідно визначити магнітну індукцію або напруженість магнітного поля, що викликається постійним струмом, який протікає в різних за

формою провідниках, або значення величини сили струмів, що обумовлюють існування магнітних полів.

Складність задач може полягати в наявному представленні необхідних для розв'язку задачі параметрів, або пошуку параметрів, які можна розрахувати лише шляхом використання додаткових фізичних закономірностей і формул.

В попередніх розділах практикуму розглядалися властивості статичних, незмінних в часі електричних і магнітних полів. В даному розділі розглядаються процеси динамічних електромагнітних взаємодій, що зумовлює цілий ряд якісно нових властивостей полів і їх закономірностей. В основі електродинаміки змінних полів лежить фундаментальний закон електромагнітної індукції, відкритий у 1931 році англійським вченим М.Фарадеєм. Суть цього закону полягає у виникненні струму в довільному провідниковому контурі при зміні магнітного потоку, що пронизує цей контур. Такий струм називається *індукційним*. Практично індукційний струм у замкненому контурі може бути створений під час руху провідникового контуру в магнітному полі, під час руху магніту відносно замкненого провідникового контуру і під час зміни струму в котушці, яка створює магнітне поле. Наряду з цим розглядають два типи індуктивних явищ в залежності від способу виникнення індукційного струму в провіднику: 1) явище самоіндукції; 2) явище взаємоіндукції. В першому випадку навколо провідника з струмом виникає магнітне поле, яке створює певний магнітний потік через власний контур провідника. Тому в замкненому контурі, в якому змінюється струм, виникає додатковий, індукційний струм. Явище виникнення індукційного струму в провіднику внаслідок зміни магнітного потоку, викликаної зміною струму в цьому ж провіднику, називається самоіндукцією, що є окремим випадком загального явища електромагнітної індукції.

Якщо розмістити провідні контури чи котушки з струмом так, що магнітні потоки кожної з них хоча б частково перетинають витки сусідніх, то між ними виникає взаємна індукція. При цьому ЕРС у кожному контурі виникає не тільки за рахунок зміни потоку індукції магнітного поля, створеного струмом даного контуру (явище самоіндукції), але й за рахунок зміни потоку індукції магнітного поля під дією струмів, які протікають в сусідніх контурах (явище взаємної індукції). Явище взаємної індукції теж є окремий випадок загального явища електромагнітної індукції, і полягає в наведенні ЕРС

індукції в провідниках, які знаходяться поблизу інших провідників, струми в яких змінюються з часом.

Окрім того змінні струми, що виникають в провідниках внаслідок описаних процесів залежать від властивостей самих провідників і середовищ, в яких ці процеси здійснюються.

Типові задачі, що пояснюються процесами електромагнітної індукції можна об'єднати в такі групи:

- Визначення електрорушійної сили індукції або самоіндукції, або інших фізичних параметрів пов'язаних з явищем електромагнітної індукції.
- Визначення параметрів змінного електричного струму і інших фізичних параметрів, які характеризують дію змінного струму в колах, що мають активні і реактивні опори.
- Розв'язок задач, що описують електромагнітні коливання та виникнення та поширення електромагнітних хвиль.

При розв'язуванні задач, віднесених до першої групи, слід зауважити, що для визначення ЕРС індукцій за законом Фарадея потрібно обчислити зміну потоку індукцій через площину контуру, незалежно від того, чим ця зміна викликана: зміною форми контуру, переміщенням контуру в неоднорідному полі чи зміною магнітної індукції поля з часом.

Маючи на увазі, що зміна потоку магнітної індукції може бути викликано зміною струму в контурі, аналогічним способом можна визначати величину ЕРС самоіндукції.

ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ І ФОРМУЛИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ РОЗВ'ЯЗУВАННІ ЗАДАЧ З ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ.

Напруженість магнітного поля, що утворюється елементом ***dl*** провідника зі струмом ***I***, у точці, що знаходиться на відстані ***r***, визначається за законом Біо – Савара – Лапласа

$$\mathrm{d}\,\mathrm{H} = \frac{\mathrm{Idlsin(I,l)}}{4\pi r^2}$$

Вектор $d\vec{\mathrm{H}}$ перпендикулярний до площини, в якій знаходиться елемент ***dl*** та ***r***. Напрям вектора напруженості визначається за правилом свердлика, що закручується в напрямку струму, тобто є дотичним до поля, що описує ручка свердлика.

Напруженість поля, що утворено струмом на скінченому відрізку провідника, визначається як:

$$\mathrm{H} = \frac{\mathrm{I}}{4\pi r}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2),$$

де α_1 і α_2 кути між напрямком струму і лінією, що з`єднує кінці провідника з точкою.

Напруженість поля нескінченного провідника з струмом

$$\mathrm{H} = \frac{\mathrm{I}}{2\pi r}.$$

Напруженість поля в центрі колового струму радіуса ***R***:

$$\mathrm{H} = \frac{\mathrm{I}}{2R}$$

Напруженість поля на осі колового струму радіуса ***R*** на відстані h від центра:

$$\mathrm{H} = \frac{IR^2}{2\left(R^2 + h\right)^{3/2}}$$

Напруженість поля в точці А на осі соленоїда:

$$\mathrm{H} = \frac{1}{2} In\left(\cos\beta_1 - \cos\beta_2\right),$$

де β_1 і β_2 – кути між віссю на напрямками від точки А до елементів крайніх витків соленоїда, $n = \frac{N}{L}; n = \frac{1}{d}$ – кількість витків на одиницю довжини соленоїда. ***L*** – довжина соленоїда, ***d*** – діаметр дроту, з якого намотано соленоїд.

Напруженість поля в центрі соленоїда:

$$\mathrm{H} = nI$$

Напруженість поля на одній з основ соленоїда:

$$\mathrm{H} = \frac{1}{2} nI$$

Обертальний момент пари сил, що діє на виток (котушку) з струмом в магнітному полі:

$$M = Bp_m \sin\alpha$$

α кут між напрямками $\vec{B}$ і $\vec{\upsilon}$

Магнітний момент контуру із струмом ***I***:

$$p_m = IS,$$

де S – площа контуру.

Циркуляція вектора напруженості $\vec{\mathrm{H}}$ магнітного поля вздовж контуру, що охоплює струм I:

$$\oint_L H_l dl = I,$$

де H_l - проекція вектора $\vec{H}$ на напрям дотичної до контуру, що включає елемент dl.

Магнітна індукція поля:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$$

Потік магнітної індукції через поверхню площею S:

$$\Phi = BS\cos(B,n)$$

n – нормаль до поверхні

Розрахунок магнітного кола виконують за формулою Гопкінсона:

$$\Phi = \frac{IN}{\frac{l}{\mu\mu_0 S}}$$, де $\frac{l}{\mu\mu_0 S}$ - магнітний опір R_m

В магнітопроводі:

$$\Phi = \frac{IN}{\sum R_m}$$

Сила, що діє на прямолінійну ділянку провідника ***dl*** з струмом ***I***, який розміщено в полі з індукцією ***B***, визначається за законом Ампера:

$$F = IBdl\sin(I,B)$$

Сила взаємодії між двома паралельними струмами в провідниках, довжина одного з яких ***l***,

$$F = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l ,$$

де ***a*** – відстань між провідниками.

Піднімальна сила електромагніту:

$$F = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} S$$

Сила, що діє на рухомий заряд в магнітному полі (сила Лоренца):

$$F_л = qB\upsilon \sin\alpha$$

α – кут між векторами $\vec{B}$ і $\vec{\upsilon}$

Робота по переміщенню провідника з струмом в магнітному полі:

$$A = I\Delta\Phi = I(\Phi_1 - \Phi_2)$$

Величина ЕРС індукції ξ_i в замкнутому контурі визначається швидкістю зміни магнітного потоку, який перетинає контур:

$$o_i = -N\frac{dЦ}{dt} = -\frac{du}{dt};$$

де N - витків контуру, $Ф$ - магнітний потік, а $ш = NЦ$ потік магнітної індукції, зчеплений з усіма витками контуру. Знак "-" вказує на те, що індукції протидіє зміна магнітного поля чи струму що її викликає і є додатньою при зменшенні струму чи магнітного потоку.

Величина ЕРС самоіндукції в кожен момент часу пропорційна швидкості зміни струму в провіднику:

$$o_i = -L\frac{dI}{dt}$$

ЕРС в провіднику довжиною dl, який переміщується в однорідному магнітному полі з сталою швидкістю υ дорівнює:

$$o_i = Bdlx\sin\left(\vec{B},\vec{x}\right)$$

Якщо рамка, що складається з N витків і має площу S обертається в однорідному магнітному полі з кутовою швидкістю ω то:

$$o_i = BNSш\sin шt$$

Індуктивність соленоїда (тороїда) довжиною l , площею перерізу S і числом витків N:

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$$

Сила струму в колі з опором R та індуктивністю L після замикання кола, змінюється з часом:

$$I = \frac{o}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{i}t}\right)$$

Після розмикання даного кола зміна струму може бути описана формулою: $I = I_0 e^{-\frac{R}{i}t}$,

де I_0 – значення сили струму при t=0.

Повна енергія магнітного поля контуру (соленоїда) визначається як:

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

Об'ємна густина енергії магнітного поля:

$$\omega = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

Закон Ома для ділянки кола, яка складається з послідовно ввімкнутих резистора опором R котушки індуктивності індукцією L конденсатора ємністю C , при протіканні змінного струму:

$$I_{еф} = \frac{U_{еф}}{Z},\ \text{де}\ Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

ω - циклічна частота змінного струму.

Активна потужність змінного струму:

$$P = I_{еф} U_{еф} \cos\varphi,\ \text{де}\ \varphi - \text{зсув фаз.}$$

Зсув фаз між напругою і струмом визначається за формулою:

$$tg\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

При послідовному або паралельному сполученні активного опору та одного з реактивних елементів зсув фаз може визначатися відповідно:

R і L послідовно $tg\varphi = \frac{\omega L}{R}$ R і L паралельно $tg\varphi = \frac{R}{\omega L}$.

R і C послідовно $tg\varphi = \dfrac{1}{\omega RC}$ R і C паралельно $tg\varphi = -\omega RC$.

Активний опір $R_A = \dfrac{P}{I_{еф}^2} = Z\cos\varphi$

$R_A = R$(омічному опору) при відсутності втрат на нагрівання залізних сердечників внаслідок гістерезису і струмів Фуко, та на нагрівання діелектриків в змінному електричному полі.

Період електромагнітних коливань T у контурі, що складається з L, R і C визначається за формулою:

$$T = \frac{2p}{\sqrt{\dfrac{I}{LC} - \left(\dfrac{R}{2L}\right)^2}}, \qquad \text{де} \frac{R}{2L} = y \text{ - коефіцієнт затухання.}$$

Якщо $R \neq 0$ то період коливань визначається за формулою Томсона:

$$T = 2p\sqrt{LC;} \qquad v = \frac{1}{2p\sqrt{LC}}.$$

Якщо опір контуру не дорівнює нулю, то коливання в такому контурі будуть затухаючі і при цьому різниця потенціалів на конденсаторі змінюється з часом за законом:

$$U = U_m e^{-yt}\cos\omega t$$

Логарифмічний декремент затухання коливань в контурі:

$$\Delta = \sigma T.$$

При $\Delta = 0, \quad U = U_m \cos\omega t$

Хвильовий опір контуру: $c = \sqrt{\dfrac{L}{C}}$.

Добротність контуру: $Q = \dfrac{c}{R}$.

При резонансі в послідовному контурі:

$$Z = R - \min.$$

При резонансі в паралельному контурі:

$$Z = \frac{c^2}{R} - \max.$$

Практичне заняття № 16.

ІНДУКЦІЯ І НАПРУЖЕНІСТЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку

в аудиторії: [6] 28.8 – 28.10, 28.12, 28.19 – 28.23.

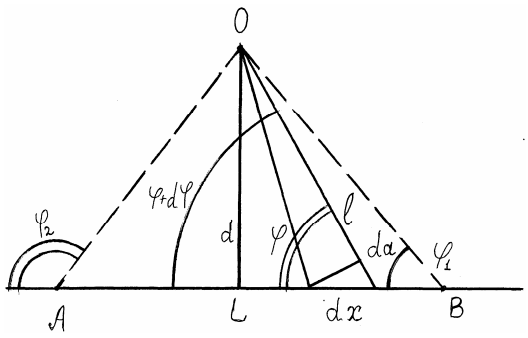
дома: [5] 3.259 – 3.270.

Задача № 16.1.

По провіднику протікає струм силою 2 *А*. Визначити магнітну індукцію поля, створеного цим струмом в точці, що знаходиться на перпендикулярі до середини відрізку провідника довжиною $L = 20\,см$ на відстані $\alpha = 20см$ від нього.

Розв'язок:

Побудуємо малюнок, що відповідає умові задачі, обравши елементарний відрізок ***dx***, по якому протікає струм, а також позначимо відстань від точки О до нього через ***l***, а кут між ***dx*** і радіусом-вектором ***l*** – через φ. Кут, під яким видно відрізок ***da*** з точки О позначимо через $d\varphi$.



Тоді згідно закону Біо – Савара – Лапласа :

$$dB = \frac{\mu\mu_0 I dx \sin\varphi}{4\pi l^2}$$

Як видно з аналізу виразу, в нього входять три змінні величини: ***dx*** , ***l*** і φ.

Зручно виразити всі змінні через змінну величину φ.

$$l = \frac{d}{\sin\varphi} \;;\; dx = \frac{da}{\sin\varphi} = \frac{l d\varphi}{\sin\varphi}$$

Отже

$$B = \mu\mu_0 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{Id\sin\varphi d\varphi}{4\pi d^2};$$

Так як $\cos\varphi_2 = \cos(\pi - \varphi_1) = -\cos\varphi_1$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi d}(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi d} 2\cos\varphi_1 = \frac{\mu\mu_0 I\cos\varphi_1}{2\pi d}$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{L}{2\sqrt{\frac{L^2}{4} + d^2}} = \frac{L}{\sqrt{L^2 + 4d^2}};$$

Отже : $$B = \frac{\mu\mu_0 Idl}{2\pi d\sqrt{L^2 + 4d^2}} = \frac{4}{3}\frac{10^{-4}}{\sqrt{544}} \approx 5{,}6\times 10^{-6}\ (\text{Тл}).$$

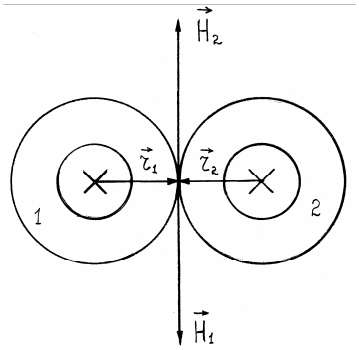
Задача № 16.2.

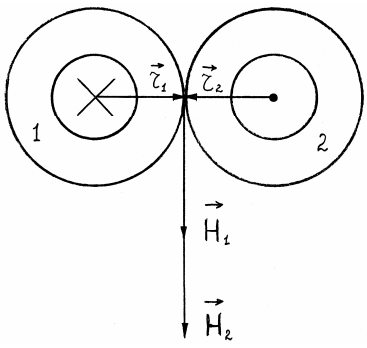
По двох довгих прямолінійних провідниках протікає струм ***I****=10 А*. Відстань між провідниками ***r****=5 см*. Визначити напруженість і магнітну індукцію поля, що утворене струмами в точці, яка рівновіддалена від провідників, за таких умов:

А) струм протилежного напрямку, якщо провідники розміщені в просторі паралельно та під кутом 60^0 або 90^0;

Б) струми одного напрямку.

Розв'язок:





Зробимо малюнки, що відповідатимуть випадкам паралельного розміщення провідників та струмам в них, що протікатимуть в одному та протилежному напрямках (переріз здійснено площиною, перпендикулярною до провідників).

Запишемо: $\vec{H}_{\sum} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2$. Для всіх випадків: $H = I/2\pi r_1$; $H_1 = I/2\pi r_2$

За умовою $r_1 = r_2$. Якщо струм протікає в одному напрямку, то:

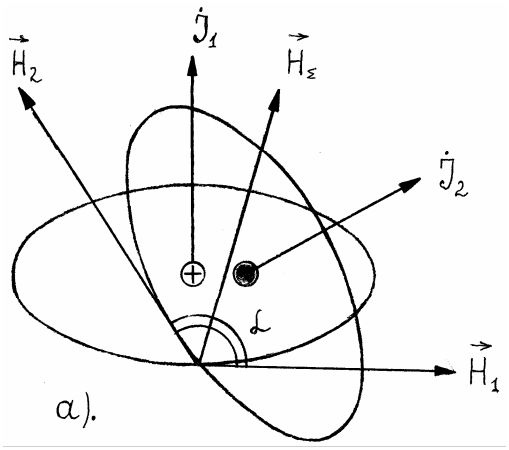
$$H = \frac{I}{2\pi r} - \frac{I}{2\pi r} = 0 \ ; \ B = 0$$

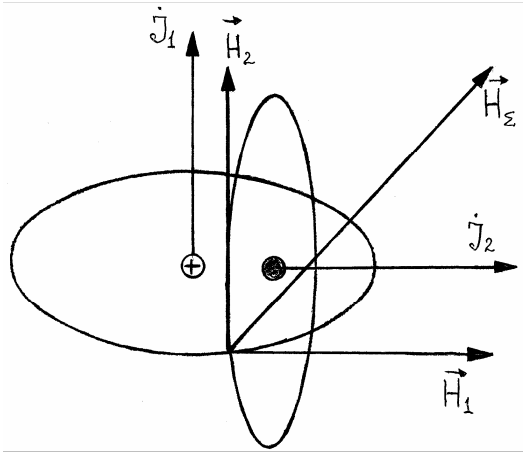
Якщо струм протікає в різних напрямках, то:

$$H = \frac{I}{2\pi r} + \frac{I}{2\pi r} = \frac{I}{\pi r} = 130\frac{A}{м} \qquad B = 1{,}6 \times 10^{-6} \text{ (Тл.)}$$

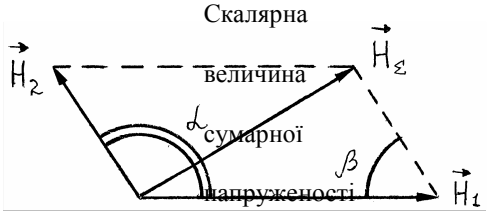
Виконаємо малюнки, що відповідають розміщенню провідників під певним кутом а) 60^0, 90^0, оберемо напрямки струмів, як вказано на малюнках.

На площинних фігурах векторні суми в точці, рівновіддаленій від провідників, визначаються як:





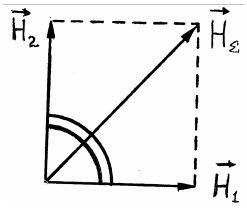
$$\vec{H}_\Sigma = \vec{H}_1 + \vec{H}_2$$



поля у випадку (а) :

$$H_\Sigma^2 = H_1^2 + H_2^2 - 2H_1H_2\cos\beta$$

Кут $\alpha = 120^0$.Отже: $H_\Sigma = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 - H_1 H_2} = H_1 = \frac{I}{2\pi r} = 63(\frac{A}{м})$



$$B_\Sigma = 4\pi \cdot 63 \times 10^{-7} \approx 8{,}5 \times 10^{-5} \text{ (Тл.)}$$

У випадку (б): $\alpha = 90^0 \quad H_\Sigma = H_1\sqrt{2} = 90(\frac{A}{м})$

$$B_\Sigma = 4\pi \cdot 90 \times 10^{-7} \approx 11{,}3 \times 10^{-5} \text{ (Тл.)}$$

У випадках зміни напрямків одного або обох струмів необхідно чітко уявляти їх просторове взаємне розміщення і зобразити на малюнку.

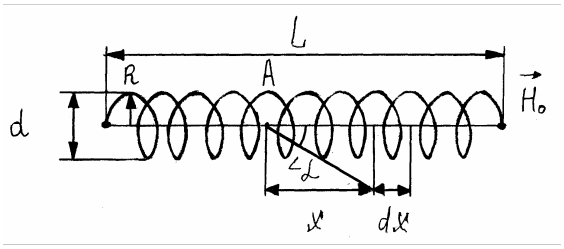
Задача № 16.3.

Визначити напруженість магнітного поля в центрі однієї з основ соленоїда довжиною $L = 10см$ і діаметром $d = 4см$, якщо він має ***N=150 витків*** і по них проходить струм ***I=0,5 А***.

Розв'язок:

Зробимо малюнок, що відповідає умові задачі.

Виберемо на осі соленоїда точку ***A***, яка відповідає положення центра соленоїда. На відстані ***x*** від центра виділимо елемент довжини соленоїда ***dx***. На цей елемент соленоїда припадає ***N/L*** витків.



Вважаючи струм, що проходить в цьому елементі соленоїда коловим, запишемо значення напруженості магнітного поля в точці *A*, яке створене цим струмом:

$$dH = \frac{IR^2 N}{2L(R^2 + x^2)^{3/2}} dx$$

Виразимо x через діаметр чи радіус соленоїда:

$$x = Rctg\alpha = \frac{R}{tg\alpha} \text{ , тоді } dx = R\frac{d\alpha}{\sin^2\alpha} \text{ крім того } R^2 + x^2 = l^2 = \frac{R^2}{\sin^2\alpha}$$

а отже $dH = \frac{IR^2 N}{2L\left(\frac{R^2}{\sin^2\alpha}\right)^{3/2}} \cdot \frac{R}{\sin^2\alpha} d\alpha = \frac{IN}{2L} \cdot \frac{R^3 d\alpha}{\frac{R^3}{\sin^3\alpha}\sin^2\alpha} = \frac{IN\sin\alpha d\alpha}{2L}$

$$H_A = \frac{IN}{2L}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin d\alpha = \frac{IN}{2L}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$$

Для точки, яка лежить в центрі однієї з основ: $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$; $\cos\alpha_2 = 0$

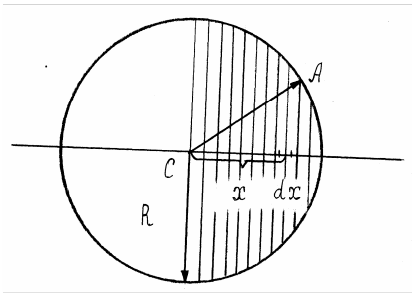
Отже : $H_0 = \frac{IN}{2L}\cos\alpha_1$ $\qquad \cos\alpha_1 = \frac{L}{\sqrt{L^2+R^2}}$ $\qquad H_0 = \frac{IN}{2\sqrt{R^2+L^2}} = 375(\frac{A}{м})$

Задача № 16.4.

Щільно укладені одним шаром *30 витків* тонкого дроту утримуються на каркасі у вигляді півсфери радіусом ***R**=10 см*. Визначити величину струму, який протікає по провіднику, якщо магнітна індукція поля в центрі сфери становить $\vec{B} = 1{,}26\times10^{-4}\,Тл$.

Розв'язок:

Виконаємо малюнок: Виділимо на відстані ***x*** від центра півсфери елемент довжиною ***dx***, на якому розміщено ***N/R*** витків. Позначивши радіус кожного витка через $r = \sqrt{R^2 - x^2}$ і вважаючи, що по кожному елементу протікає коловий струм, запишемо значення індукції магнітного поля:



$$dB = \frac{\mu\mu_0 Ir^2}{2\left(r^2+x^2\right)^{3/2}}\cdot\frac{N}{R}dx = \frac{\mu\mu_0 IN\left(R^2-x^2\right)dx}{2R^4}$$

Проінтегруємо вираз від ***0*** до ***R***, одержимо значення магнітної індукції:

$$B = \frac{\mu\mu_0 IN}{2R^4}\int_0^R \left(R^2-x^2\right)dx = \frac{\mu\mu_0 IN}{3R}$$

Звідки: $I = \frac{3BR}{\mu\mu_0 N}$. Врахувавши, що ***μ=1***, визначимо ***I***:

$$I = \frac{3\cdot1{,}26\cdot10^{-4}\cdot10\cdot10^{-2}}{1{,}26\cdot10^{-6}\cdot30} = 1(A).$$

Задача № 16.5.

По циліндричному провіднику діаметром *0,4 см* за $0{,}3\times10^{-8}$ *с* переноситься сторонніми силами, рівномірно розподіленими по перерізу провідника, заряди, сумарна величина яких *0,6 нКл*. Визначити напруженість магнітного поля в точках на відстанях r_1 *=0,1 см* і r_2 *=4 см* від осі провідника.

Розв'язок:

При аналізі даних задачі зрозуміло, що точка на відстані r_1=*0,1 см* від осі знаходиться в провіднику, а точка з r_2=*4 см* – за його межами.

Згідно з симетрією напруженість ***H*** для всіх точок, які розміщені від осі на однаковій відстані ***r***, буде однаковою. Для розрахунку величини скористаємось виразом циркуляції вектора напруженості магнітного поля, і запишемо її вираз стосовно першої умови (r_1): $\oint H_1 dr_1 = H_1 2\pi r_1 = I_1$

I₁ – величина струму, що проходить всередині обраного нами контуру радіусом r_1:

$I_1 = \frac{q}{t} \cdot \frac{\pi r_1^2}{\pi R^2} = \frac{q}{t} \cdot \frac{r_1^2}{R^2}$, отже, $H = \frac{q r_1^2}{t R^2 2\pi r_1} = \frac{q r_1}{2\pi R^2 t} \approx 8(\frac{A}{м})$

Запишемо вираз циркуляції вектора напруженості магнітного поля стосовно другої умови (r_2): $\oint H_2 dr_2 = H 2\pi r_2 = I,$

I – величина струму, що проходить всередині обраного нами контуру радіусом r_2.

Отже: $H \cdot 2\pi r_2 = \frac{q}{t}; \quad H = \frac{q}{2\pi r_2 t} = 0{,}8\,(A/м.)$

Практичне заняття № 17.

ВЗАЄМОДІЯ СТРУМІВ. ЗАКОН АМПЕРА. СИЛА ЛОРЕНЦА.

Задачі, рекомендовані для розв'язку

в аудиторії: [6] 28.32 – 28.38, 28.54 – 28.60.

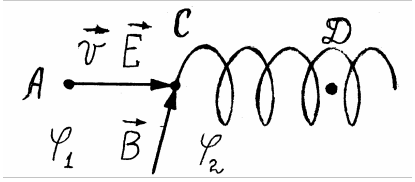
дома: [5] 3.274, 3.275, 3.278 – 3.280, 3.291 – 3.296.

Задача № 17.1.

Електрон з дуже малою початковою швидкістю проходить однорідному електричному полі з різницею потенціалів *1000 В*. Після цього він потрапляє в перпендикулярне до напрямку його напрямку магнітне поле. Необхідно визначити ларморівський радіус руху електрона.

Розв'язок:

Виберемо напрямок руху електрона та напрямок вектора магнітної індукції, виконаємо малюнок, що відповідає умові задачі.



Нехай вектор напруженості електричного поля направлений зліва

направо, а напрямок ***B*** – від нас до площини малюнка в точці ***C***.

За час ***dt*** електрон пройде шлях ***CD = dl*** в напрямку швидкості $\vec{\upsilon}$, переміщення електрона вздовж ***dl***

еквівалентне величині струму ***I*** по цій ділянці. Величина цього струму: $I = \frac{e}{dt}$

Однорідне магнітне поле діє на елемент струму ***Idl*** силою:

$$d\vec{F} = I\vec{B}dl\sin\alpha,$$

Оскільки $\alpha = 90^0$, то $\sin\alpha = I$, тому: $dF = IBdl$, або $dF = B\frac{e}{dt}dl = Be\upsilon$

Сила Лоренца, яка виражається цією рівністю, перпендикулярна до напрямку швидкості електрона, а тому під її дією змінюється лише напрям швидкості електрона, тобто електрон набуває нормального (доцентрового)

прискорення по ларморівському радіусу: $a = \frac{\upsilon^2}{R}$; отже:

$$dF = \frac{m\upsilon^2}{R} = eB\upsilon.$$

Звідси: $R = \frac{m\upsilon}{eB}$. Величину швидкості електрона в магнітному полі можна визначити як величину швидкості,

яку набув електрон, пролетівши різницю потенціалів:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = 1000\,(B), \qquad eU = \frac{m\upsilon^2}{2} - \frac{m\upsilon_0^2}{2},$$

де υ_0 за умовою можемо вважати рівною нулю. Тому: $eU = \frac{m\upsilon^2}{2}$.

Таким чином: $R = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2mU}{e}}$; R=0,001 (м).

Задача № 17.2.

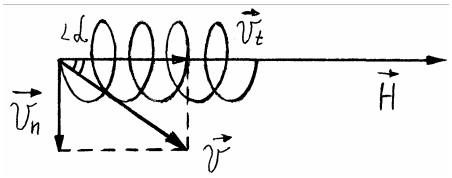
Протон, набувши швидкості $\upsilon = 2 \cdot 10^4 \; м/с$, влітає в магнітне поле під кутом 30^0 до напрямку вектора напруженості поля $H = 2{,}4 \cdot 10^3 \; А/м$. Визначити крок гвинтової лінії руху протона.

Розв'язок:

На протон діє сила Лоренца, яка перпендикулярна до напруженості поля і швидкості його руху. Тобто:

$F = e\upsilon B \sin\alpha,$ Зробимо малюнок.

Під дією сили Лоренца протон набуває обертального руху по колу радіусу R з нормальним прискоренням:



$$a = \frac{\upsilon^2}{R}$$

Оскільки $\vec{\upsilon}\sin\alpha = \vec{\upsilon}_n$, запишемо: $F = \mu\mu_0 He\upsilon_n$.

В результаті одночасного руху по колу і вздовж прямої протон рухається вздовж гвинтової лінії. Для визначення кроку гвинтової лінії запишемо: $h = \upsilon_t T$, період обертання протона визначимо із формули:

$$T = \frac{2\pi R}{\upsilon_n}, \quad \text{а} \quad h = \frac{2\pi R\upsilon_t}{\upsilon_n};$$

Таким чином, необхідно визначити радіус обертання протона:

$$\mu\mu_0 He\upsilon_n = \frac{m\upsilon^2}{R};$$

Звідси: $$R = \frac{m\upsilon}{\mu\mu_0 He\sin\alpha}; \qquad R \approx 0{,}14 \; (м).$$

Отже, $$h = \frac{2\pi m\upsilon\upsilon_t}{\mu\mu_0 He\sin\alpha\upsilon_n} = \frac{2\pi m\upsilon\cos\alpha}{\mu\mu_0 He\sin\alpha^2}; \qquad \boldsymbol{h}=1{,}5(м).$$

Задача № 17.3.

Відрізок шини і провідника, з'єднані між собою діелектричними пружинами, і розміщені в вертикальній площині. Якщо по шині і провіднику не проходить струм, і відстань між ними дорівнює ***h***. Визначити відстань між шиною і провідником, якщо по них відповідно проходять струми I_1 і I_2. Вважати, що провідник не зміщується від вертикального положення. Коефіцієнт пружності кожної пружини ***k***, а довжина провідника ***L***.

Розв'язок:

Можливі два випадки:

а) струми в шині і провіднику протікають в одному напрямку;

б) струми в шині і провіднику мають різні напрямки.

Для розв'язування скористуємося формулою законе Ампера: $F = IBdx\sin\left(\vec{B},\vec{dx}\right)$

Розглянемо перший випадок. Напруженість магнітного поля струму I_1 в точках другого провідника на відстані ***x*** має вигляд: $H = \frac{I_1}{2\pi x};$

Оскільки вектор $\vec{H}$ перпендикулярний до ***L***, сила Ампера дорівнює:

$$F_1 = BI_2L = \mu\mu_0 H_1 I_2 L = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi x}.$$

Аналіз напрямків векторів сил показує, що провідники притягуються. Поруч з силою Ампера на провідники діють сили тяжіння і пружності. Їх рівнодійна напрямлена вниз дорівнює: $F' = 2k\left(x-h\right).$

В положенні рівноваги $F_1 = F'$, а отже, $2k\left(h-x\right) = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi x};\ \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 L}{4\pi k} + x^2 - hx = 0$

При розв'язку рівняння дістанемо два значення ***x***.

$$x_1 = \frac{h}{2} + \sqrt{\frac{h^2}{4} - \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 L}{4\pi k}};\qquad x_2 = \frac{h}{2} - \sqrt{\frac{h^2}{4} - \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 L}{4\pi k}}.$$

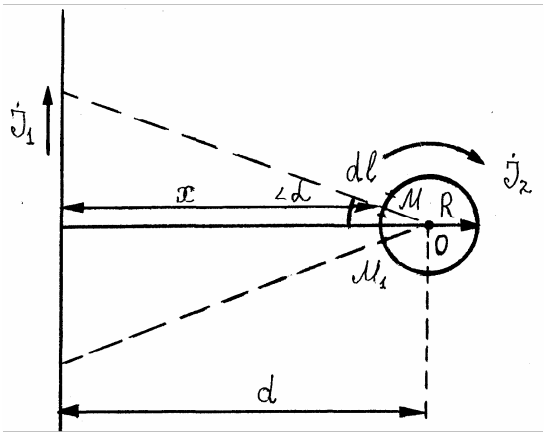
Проаналізувавши підкореневі вирази можна стверджувати, якщо $k < \frac{4\mu\mu_0 I_1 I_2 L}{4\pi h^2}$, то провід притягнеться до шини. Розв'язок x_1 характеризує стійку рівновагу, а x_2 – нестійку. Якщо струми I_1 I_2 мають протилежні напрямки, то провід буде перебувати в стійкій рівновазі на відстані h_2:

$$h_2 = \frac{h}{2} + \sqrt{\frac{h^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 L}{4\pi k}}.$$

Задача № 17.4.

Визначити дію прямого нескінченного струму I_1 на коловий контур, вздовж якого тече струм силою I_2. Радіус контуре R, а відстань його центра від нескінченного струму d. Коловий струм I_2 та струм I_1 знаходяться в одній площині.

Розв'язок:



Сили, що діють на елементи колового контуру, напрямлені по радіусах, і згідно з напрямом струму, від центра.

Для розв'язання задачі оберемо точку M на колі і на відстані x від прямого струму та симетричну їй M_1.

Напруженість магнітного поля в цій точці створена струмом I_1 дорівнює:

$$H = \frac{I_1}{2\pi x}$$

Сила, що діє на елемент струму $I_2 d_1$ біля точки M запишемо як:

$$dF = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 dl}{2\pi x}$$

Розкладаємо цю силу на дві складові: паралельну і перпендикулярну до I_1. Якщо елемент d_1 в точці M зв'яжемо з симетричним d_1 в точці M_1, то всі складові, що паралельні струму, взаємно знищуються. Залишаються перпендикулярні складові, результуюча яких дорівнює:

$$F = \oint \frac{2\mu\mu_0 I_1 I_2 \cos\alpha dl}{2\pi x}$$

З малюнка видно, що: $dl = \frac{dx}{\sin\alpha}$ і $ctg\alpha = \frac{d-x}{\sqrt{R^2-(d-x)^2}}$;

Звідки: $F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{\pi} \int_{d-R}^{d+R} \frac{(d-x)dx}{x\sqrt{R^2-(d-x)^2}}$; Отже, $F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{\pi} \cdot \left[\frac{d}{\sqrt{d^2-R^2}} - I\right]$.

Задача № 17.5.

По кільцю діаметром d=0,1 м із свинцевого провідника площею перерізу S=*0,7мм* проходить струм силою I=*2А.* Чи розірветься кільце в перпендикулярному магнітному полі індукцією B=*0,2Тл*, якщо при температурі, до якої нагрівся провідник при проходженні струму, його міцність на розрив $p_0 = 2 \cdot 10^6$ *Н/м*.

Розв'язок:

За законом Ампера сила, з якою магнітне поле діє на елемент провідника з струмом, дорівнює:

$dF = BIdl\sin(\vec{B},\vec{dl})$, За умовою задачі : $\sin(\vec{B},\vec{dl}) = I$.

Обчислимо, з якою силою одна половина кільця взаємодіє з другою половиною. Виберемо вертикальну вісь, що поділяє кільце на дві половини. Тоді проекція ***dF*** елементарної сили на цю вісь дорівнює:

$$dF_r = BI\sin\varphi d\varphi, \text{ де } Rd\varphi \approx dl.$$

Проінтегрувавши дане рівняння, визначимо проекцію сили, що діє на половину кільця:

$$F_r = IBR\int_{-\pi/2}^{+\pi/2}\sin\varphi d\varphi = 0.$$

Отже, ця сила дорівнює нулю. Аналогічно знаходимо проекцію сили на вісь ***x***, яка перпендикулярна до осі ***y***:

$$F_x = IBR\int_{-\pi/2}^{+\pi/2}\cos\varphi d\varphi = 2IBR.$$

Враховуючи, що сила F_x діє на обидва поперечних перерізи, матимемо:

$$p = \frac{F_x}{2S} = \frac{2IBR}{2S} = \frac{IBd}{2S};$$

$$p = 10^6\ Н/м.$$

Отже, $p < p_p$. Кільце не розірветься.

Практичне заняття № 18.

МАГНІТНИЙ ПОТІК. РОБОТА ПО ПЕРЕМІЩЕННЮ ПРОВІДНИКА ІЗ СТРУМОМ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [6] 28.76 – 28.84.
дома: [5] 3.313 – 3.322.

Задача № 18.1.

Плоский квадратний контур з стороною ***a**=10см*, вздовж якого тече струм ***I**=100А*, вільно встановився в однорідному магнітному полі індукцією ***B**=1Тл*. Визначити роботу зовнішніх сил при повороті контуру відносно осі, яка проходить через середини протилежних сторін контуру, на кут: 1) $\alpha_1 = \pi/2$. і 2) $\alpha_2 = 0{,}05$ *рад*. При повертанні контуру сила струму в ньому не змінюється.

Розв'язок:

Як відомо, на контур зі струмом в магнітному полі діє обертальний механічний момент:

$$M = p_M B \sin\alpha,$$

де p_M магнітний момент, α - кут між вектором $\vec{p}_M$, що напрямлений по нормалі до площини контуру і вектором $\vec{B}$.

За умовою контур вільно вставлений, отже ***M**=0*, а значить $\alpha = 0$, тобто вектори $\vec{p}_M$ і $\vec{B}$ співпадають за напрямком. Робота зовнішніх сил здійснюється внаслідок виведення контуру з даного положення при повороті на деякий кут $d\alpha$. Отже, елементарна робота зовнішніх сил: $dA = Md\alpha$.

Виходячи з того, що $p_M = Ia^2$, запишемо: $dA = IBa^2 \sin\alpha d\alpha,$

Взявши інтеграл цього виразу, знайдемо роботу зовнішніх сил при повороті рамки на деякий кут α :

$$A = IBa^2 \int_0^{\alpha} \sin\alpha d\alpha ,$$

Робота при повороті на кут $\alpha_1 = \pi/2$:

$$A_1 = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin\alpha d\alpha = IBa^2 \left| -\cos \right|_0^{\pi/2} = IBa^2 .$$

Підставивши числові значення, одержимо : $A_1 = 1$ *(Дж)*.

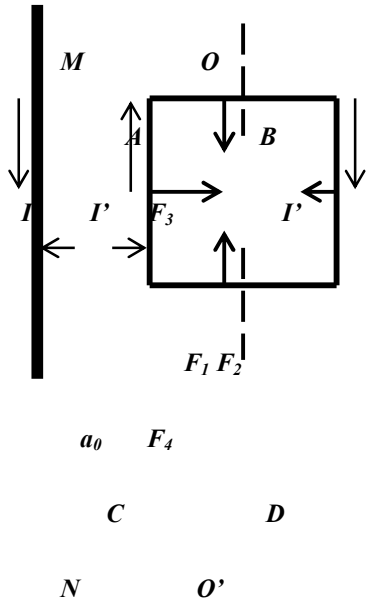
2) Оскільки кут α_2 малий, замінимо $\sin\alpha_2 \approx \alpha_2$. Підставивши числові значення, одержимо $A_2 = 1{,}25$ *(мДж)*.

Задача № 18.2.

Поруч з довгим прямим проводом ***MN,*** по якому проходить струм силою ***I***, розташована квадратна рамка зі стороною ***l***, по якій проходить струм силою ***I'***. Рамка лежить в одній площині з проводом так, що найближча сторона рамки знаходиться на відстані a_0 від проводу. Визначити магнітну силу, що діє на рамку, та роботу цієї сили по переміщенню рамки за межі поля. Струми ***I*** та ***I'*** весь час підтримуються сталими.

Розв'язок:

Рамка зі струмом знаходиться в неоднорідному магнітному полі. Можливі два способи розв'язку цієї задачі.



<u>Перший спосіб</u>: На кожний елемент довжини контуру ***ABCD*** з боку магнітного поля, створеного струмом ***I***, діятиме сила Лоренца:

$$d\vec{F} = I\vec{B}dl\sin\alpha,$$

Користуючись правилом свердлика визначимо напрямок лінії індукції магніт-

ного поля а потім, користуючись правилом лівої руки, визначимо напрям сил, що діють на кожну із сторін рамки (сили F_1, F_2, F_3, F_4 на малюнку). Сторони ***AB*** та ***CD*** розташовані однаково відносно проводу ***MN***. Сили F_3 та F_4, що діють на них рівні і протилежні за напрямом. Отже, зрівноважують одна одну. Таким чином, рівнодіюча сил, прикладених до контуру, рівна

$$F = F_1 - F_2$$

і направлена в бік від проводу. Обчислимо сили F_1 та F_2:

$$F_1 = I' B_1 l \sin\alpha \qquad F_2 = I' B_2 l \sin\alpha ,$$

тут B_1 і B_2 – індукція магнітного поля, створеного струмом I, що протікає по проводу MN в провідниках AC та DB, тобто на відстані a_0 та $a_0 + l$ від проводу MN відповідно. Кут α - це кут між напрямом вектора індукції магнітного поля $\vec{B}$ та напрямом струму I' ($\alpha=90^0$, $\sin\alpha=1$). Індукції магнітного поля B_1 і B_2, створеного нескінченно довгим проводом MN на відстанях a_0 та $a_0 + l$ обчислимо як:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{a_0}; \quad B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{l + a_0}$$

звідси:

$$F = F_1 - F_2 = \frac{\mu_0 I \cdot I' \cdot l}{2\pi}\left(\frac{1}{a_0} - \frac{1}{a_0 + l}\right);$$

При видаленні рамки за межі поля струму I сили F_1 та F_2, які тепер будуть розглядатись як змінні, здійснять роботу: сила F_1 – додатню роботу A_1, сила F_2 – від'ємну роботу A_2. Повна робота, виконана при цьому магнітними силами:

$$A = A_1 + A_2 = \int_{a_0}^{\infty} F_1 da - \int_{a_0+l}^{\infty} F_2 da$$

Сила F_1 перемістив провідник з відстані a_0 до відстані a_0+l далі здійснить роботу по переміщенню в нескінченність таку ж, як і сила F_2. Отже:

$$A = \int_{a_0}^{a_0+l} F_1 da = \frac{\mu_0 I \cdot I' \cdot l}{2\pi} \int_{a_0}^{a_0+l} \frac{da}{a} = \frac{\mu_0 I \cdot I' \cdot l}{2\pi} \ln\frac{a_0 + l}{a_0}$$

Другий спосіб: Обчислимо роботу магнітних сил розрахувавши зміну магнітного потоку $\Phi - \Phi_0$ через контур $ABCD$. Φ_0 – магнітний потік при початковому положенні контуру: $A = (\Phi - \Phi_0)I' = \Delta\Phi I' = -\Phi_0 I'$.

Для визначення магнітного потоку Φ_0 розіб'ємо поверхню, обмежену контуром $ABCD$ на елементарні полоски, паралельні до MN, довжиною l і шириною da. Тоді:

$$d\Phi = B_n dS = -Blda = -\frac{\mu_0 I \cdot l}{2\pi}\frac{da}{a}$$

повний потік через весь контур ***ABCD***:

$$\Phi_0 = \int_S B_n dS = -\frac{\mu_0 I \cdot l}{2\pi}\int_{a_0}^{a_0+l}\frac{da}{a} = \frac{\mu_0 I \cdot l}{2\pi}\ln\frac{a_0+l}{a_0}$$

отже:

$$A = -\Phi_0 I' = \frac{\mu_0 I \cdot I' \cdot l}{2\pi}\ln\frac{a_0+l}{a_0}$$

Для знаходження магнітної сили, що виконала цю роботу продиференцюємо рівняння ***dA = Fda*** з урахуванням отриманого для ***A*** значення:

$$F = \frac{dA}{da} = \frac{\mu_0 I \cdot I' \cdot l}{2\pi}\left(\frac{1}{a_0} - \frac{1}{a_0+l}\right)$$

В даній задачі обидва способи виявились однаково дійовими, результати співпадають, але, в загальному випадку, другий спосіб є більш універсальним.

Практичне заняття № 19.

МАГНІТНЕ ПОЛЕ В РЕЧОВИНІ. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.

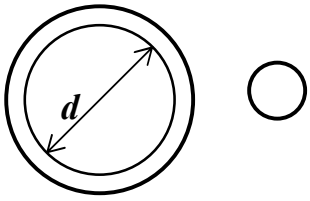
Задачі, рекомендовані для розв'язку

в аудиторії: [6] 30.7 – 30.13, 29.48 – 29.53.

дома: [5] 3.370 – 3.371, 3.375, 3.358 – 3.362.

Задача № 19.1.

На стальному намагніченому тороїді, середній діаметр якого ***d****=0,3м* і площа поперечного перерізу ***S****=1,6·10^{-4}м^2*, намотана обмотка, що містить ***N****=800* витків. Коли по обмотці пустили струм силою ***I****=1,8А*, чутливий гальванометр з опором ***R****=0,8 Ом* зафіксував відхилення, що відповідає проходженню заряду ***q****=0,24мКл*. Визначити напруженість поля ***H***,



магнітну індукцію ***B*** всередині кільця, намагніченість кільця ***J*** та магнітну проникність сталі μ.

Розв'язок:

Напруженість поля всередині тороїда залежить лише від струму в обмотці:

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{NI}{\pi d}.$$

Як видно з формули, напруженість залежить від діаметра. Але, враховуючи значення ***d*** і ***S***, можна вважати величину ***H*** (як і ***B***) сталою для всього кільця.

Для обчислення індукції ***B*** скористаємось зв'язком її з магнітним потоком всередині тороїда: $\Phi = BS$.

При включенні струму магнітний потік в тороїді зріс від нуля до Φ, що привело до появи індукційного струму в колі гальванометра. Заряд, який пройшов за час зміни потоку визначимо виходячи із закону електромагнітної індукції Фарадея-Максвелла:

$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt}$; звідки $IR = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$; отже $q = -\frac{\Delta\Phi}{R}$; опускаючи знак " – " маємо:

$\Delta\Phi = \Phi = qR$, а отже: $B = qR/S$.

Знаючи величини *H* та ***B*** легко визначити ***J*** та μ.

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H = \frac{qR}{\mu_0 S} - \frac{NI}{\pi d}. \quad \mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{qR\pi d}{\mu_0 SNI}.$$

$H=1{,}5\cdot10^3$ А/м; $B=1{,}2$ Тл; $J=1{,}0\cdot10^6$ А/м; $\mu=6\cdot10^2$.

Задача № 19.2.

При вимиканні струму в обмотці тороїда, описаного в попередній задачі, через гальванометр пройшов заряд $q'=80$ мкКл. Визначити залишкову намагніченість ***J'*** стального кільця та залишкові напруженість ***H'*** і індукцію ***B'*** магнітного поля всередині кільця після зникнення струму в обмотці.

Розв'язок:

Скористаємось розв'язком попередньої задачі.

Якщо струму в обмотці не буде $I = 0$, то і $H' = NI/\pi d = 0$.

Заряд, що пройшов через гальванометр $$q' = \frac{\Phi - \Phi'}{R} = \frac{BS - B'S}{R}$$

тут Ф та Ф' – магнітні потоки в кільці до і після зникнення струму відповідно.

Звідки:

$$B - B' = q'R/S; \quad B' = (q - q')R/S \quad J' = B'/\mu_0 = (q - q')R/\mu_0 S.$$

$$B' = 0{,}8\ Тл; \quad J' = 6 \cdot 10^5\ А/м.$$

Задача № 19.3.

На стержень з немагнітного матеріалу завдовжки $l=50см$ і площею поперечного перерізу $S=2см^2$ намотано в один шар провідник так, що на кожен сантиметр довжини стержня припадає *20* витків. Визначити енергію магнітного поля провідника, якщо сила струму в ньому $I=0{,}5А$.

Розв'язок:

Енергію магнітного поля соленоїду визначимо як: $W = \frac{LI^2}{2}$, індуктивність соленоїда $L=\mu_0\mu n^2 V$. Отже,

$$W = \frac{\mu_0 \mu n^2 V I^2}{2} = \frac{\mu_0 \mu n^2 l S I^2}{2}; \quad W=6{,}3 \cdot 10^{-5} Дж.$$

Задача № 19.4.

Визначити об'ємну густину енергії магнітного поля в повітрі на відстані $a=1м$ від дуже довгого провідника, по якому теча струму силою $I=10А$.

Розв'язок:

Об'ємна густина енергії магнітного поля обчислюється як: $\omega_m = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2}$; Індукцію магнітного поля обчислимо як: $B = \frac{\mu_0\mu I}{2\pi a}$

Оскільки провідник в повітрі, то $\mu=1$. Будемо мати:

$$\varpi_m = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0}\left(\frac{\mu_0 I}{2\pi a}\right)^2 = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 a^2} \qquad \varpi_m = 1{,}6\cdot 10^{-6}\,Дж/м^3.$$

Практичне заняття № 20.

ЗАКОН ФАРАДЕЯ-МАКСВЕЛЛА. ІНДУКТИВНІСТЬ, САМОІНДУКЦІЯ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку

в аудиторії: [6] 29.5 – 29.9, 29.28 – 29.34.

дома: [5] 3.325, 3.328, 3.329, 3.341 – 3.344, 3.350 – 3.354.

Задача № 20.1.

Визначити ЕРС індукції в стержні довжиною l, який переміщується паралельно самому собі в однорідному магнітному полі з швидкістю υ. Магнітне поле викликане проходженням колового струму і є перпендикулярним до стержня.

Розв'язок:

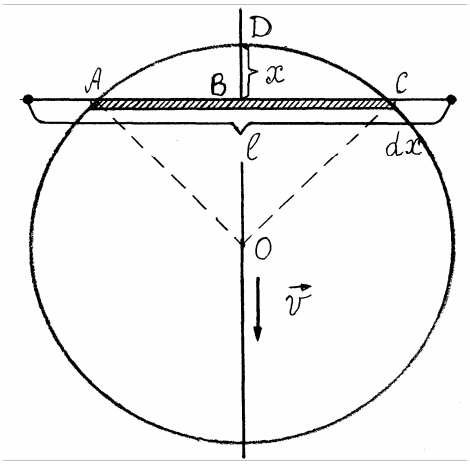
Виконаємо малюнок, що зображає цей процес. Виберемо напрям переміщення стержня і вкажемо його стрілкою. В кожен момент часу різна частина стержня буде знаходитись в магнітному полі польового струму. Будемо вважати, що в вибраний нами момент спостереження стержень обмежений довжиною *АС*. Виберемо на відстані *ВД=Х* нескінченно малу площу:

$dS = ACdx$.

Якщо позначимо час руху стержня з точки *Д* в точку *В* через *t* то $x = \upsilon t$

Для визначення ЕРС індукції необхідно знати зміну магнітного потоку, час протягом якого відбулась ця зміна та кількість витків в рамці польового струму. Оскільки $d\Phi = BdS$ визначимо *dS* через швидкість та зміну часу.

$dx = \upsilon dt$ тоді $dS = AC\upsilon dt \quad AC = 2\sqrt{2R_x - x^2}$



Підставивши значення *x* одержимо:

$dS = 2\upsilon\sqrt{\upsilon t(2R-\upsilon t)}dt$

Елементарний потік через *dS* записується як:

$d\Phi = BdS = 2B\upsilon\sqrt{\upsilon t(2R-\upsilon t)}dt$

Отже: ЕРС індукції в стержні утворена одним витком з струмом в момент часу *t* дорівнює:

$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -2B\upsilon\sqrt{\upsilon t(2R-\upsilon t)}.$$

Якщо поле напрямлене з площини малюнка, а стержні рухаються зверху вниз, то ЕРС індукції визначається зменшенням потенціалу справа наліво.

Задача № 20.2.

Визначити струм індукції рамки площею $S = 0{,}1м^2$ і активним опором *R=0,5Ом*, що протягом *0,4с* повертається в магнітному полі Землі (B=5×10^{-5} *Тл*) з одного в друге можливі крайні положення.

Розв'язок:

Як відомо крайніми можливими положеннями можуть бути:

А) положення паралельно лініям індукції,

Б) положення перпендикулярно лініям індукції.

Коли рамка перпендикулярна лініям індукції $\Phi_1 = 0$.

Якщо ж рамка перпендикулярна лініям індукції $\Phi_2 = BS$ отже кількість індукованої електрики буде: $q = \frac{\Delta Ц}{R} = \frac{BS}{R}$, $(\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2)$, а

Величина струму $I = \frac{q}{\Delta t}$ або $I = \frac{q}{t}$ оскільки $\Delta t = t - t_0$, а $t_0 = 0$

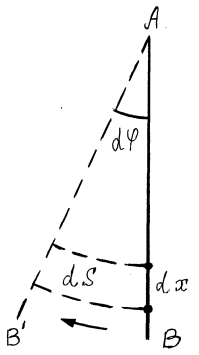
$$I = 0{,}25\ \text{А}.$$

Задача № 20.3.

Визначити різницю потенціалів між кінцями стержня довжиною *l*=0,4м який обертається відносно одного із своїх кінців з кутовою швидкістю $\omega = 10c^{-1}$ в магнітному полі індукцією $B = 10^{-3}$ Тл , яке перпендикулярне до площини обертання стержня.

Розв'язок:

Виконаємо рисунок, що відповідає умові задачі. Позначимо кінці стержня довжиною *l* буквами *A* і *B*.



Якщо мова іде про різницю потенціалів на кінцях стержня це значить, що коло розімкнене.

Визначимо можливу ЕРС індукції. Для цього слід знати $d\Phi$ і dt

Виберемо на відстані x від точки обертання елемент довжини стержня dx. При повороті стержень переміститься на кут $d\varphi$, а елемент dx опише площу dS:

$$dЦ = BdS\cos\left(\vec{B},\vec{n}\right) = Bxdxd\varphi$$

Елементарне значення ЕРС індукції в елементі dx визначається як :

$$d\xi_i = -\frac{dЦ}{dt} = -B\omega xdx.$$

Тоді ЕРС індукції в стержні довжиною l:

$$\xi_i = -\int_0^l B\omega xdx = -B\omega\frac{l^2}{2}.$$

А отже різниця потенціалів при розімкненому колі: $\varphi_A - \varphi_B = U = \frac{B\omega l^2}{2}$.

Задача № 20.4.

Визначити коефіцієнт самоіндукції тороїда довжиною l=0,5м площею перерізу S =0,1м^2 і числом витків N=3000. Магнітна проникність сердечника соленоїда $\mu = 2$.

Розв'язок:

Величину коефіцієнта самоіндукції можна знайти за співвідношенням:

$$Ц = LI.$$

Магнітний потік через поперечний переріз одного витка дорівнює: $\Phi_1 = BS$.

Потік через усі витки дорівнює: $Ц = BSN = \mu\mu_0 HSN$.

Оскільки $H = \frac{NI}{l}$, то $Ц = \mu\mu_0 SI\frac{N^2}{l}$, отже $L = \frac{Ц}{I} = \frac{\mu\mu_0}{l}SN^2 = 4{,}6$ (Гн.)

Задача № 20.5.

По довгому соленоїду з намагніченим осердям перерізом S=0,5см^2, що містить N=1200витків, проходить струм силою =2А. Індукція магнітного поля в центрі соленоїда В=10мТл. Визначити його індуктивність.

Розв'язок:

Індуктивність довгого соленоїда обчислимо з формули: $L = \frac{\mu_0}{l} SN^2$,. Довжину соленоїда обчислимо з: $B = \frac{\mu_0 NI}{l}$; $l = \frac{\mu_0 NI}{B}$. Отже:

$$L = \frac{NBS}{l}; \quad \boldsymbol{L} = 3{,}0 \cdot 10^{-3} Гн.$$

Задача № 20.6.

Котушка має опір =8 Ом, індуктивність =0,2 Гн. Через який час після вмикання котушки в електричне коло в ній встановиться така сила струму, що дорівнює половині повної сили струму, що встановиться через тривалий час?

Розв'язок:

Поступове зростання сили струму в описаному в умові колі обумовлено явищем екстраструмів замикання. Це зростання сили струму після замикання кола описується законом:

$$I = I_0\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$$

тут $\boldsymbol{I_0}$ – максимальне значення сили струму, яке встановиться через деякий час, $\boldsymbol{R}$ та $\boldsymbol{L}$ – опір та індуктивність котушки. За умовою задачі $\boldsymbol{I=I_0/2}$, отже:

$$\frac{I_0}{2} = I_0\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right), \text{ або } \frac{1}{2} = \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right), \text{ звідки: } \left(e^{-\frac{R}{L}t}\right) = \frac{1}{2}.$$

Прологарифмуємо останнє рівняння: $-\frac{R}{L}t = \ln\frac{1}{2}$, або $\frac{R}{L}t = \ln 2$, звідки:

$$t = \frac{L\ln 2}{R} = \frac{0{,}2}{8}\ln 2; \quad \boldsymbol{t=0{,}017c.}$$

Задача № 20.7.

Електричне коло складається з котушки, індуктивність якої $\boldsymbol{L}$*=0,2Гн*, опір якої $\boldsymbol{R}$*=1,6 Ом* та джерела струму. З кола одночасно вимикають джерело струму і накоротко замикають котушку. У скільки разів зменшиться сила струму в котушці через $\boldsymbol{t}$*=0,05с*?

Розв'язок:

Після одночасного вимикання джерела струму і замикання котушки струм не буде зникати миттєво за рахунок явища екстраструмів розмикання. Зміну сили індукційного струму в котушці після розмикання кола опишемо зо законом:

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$$

тут $\boldsymbol{I_0}$ – значення сили струму до розмикання кола. $\boldsymbol{R}$ та $\boldsymbol{L}$ – опір та індуктивність котушки, $\boldsymbol{t}$ = *0,05с*.
Визначимо, у скільки разів зменшилась сила струму:

$$n = \frac{I_0}{I} = \frac{I_0}{I_0 e^{-\frac{R}{L}t}} = e^{\frac{R}{L}t} = e^{\frac{1,6}{0,2}\cdot 0,05};$$

n=1,5 рази.

Практичне заняття № 21.
ЗМІННИЙ СТРУМ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку
в аудиторії: [5] 4.221 – 4.226, 4.230 – 4.232.
дома: [5] 4.218 – 4.220, 4.233 – 4.237, 4.243.

Задача № 21.1.

Визначити ефективну напругу генератора змінного струму при наявності двох синусоїдальних напруг з частотою ν_1= 50 Гц і амплітудою U_1 = 170 В та частотою ν_2 = 150 Гц і амплітудою U_2= 20 В.

Розв'язок:
Генератори змінного струму дають ЕРС, що є сумою ЕРС основної частоти і декількох значно менших ЕРС з частотами в три, п'ять і т.д. раз більшими основної частоти.
А тому для розв'язку задачі потрібно використати формулу взаємозв'язку $U_{\text{еф}}$ і миттєвим значенням напруги *U:* $U_{еф}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T (U_1 \sin 2\pi\nu_1 t + U_2 \sin 6\pi\nu_1 t)^2\, dt$;

$$U_{еф}^2 = \frac{1}{T}\left[\int_0^T U_1^2 \sin^2 2\pi\nu_1 t dt + \int_0^T U_2^2 \sin^2 6\pi\nu_1 t dt + \int_0^T 2U_1U_2 \sin^2 2\pi\nu_1 t \sin 6\pi\nu_1 t dt\right]$$

Як відомо з інтегрального числення: $\int \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{2}t - \frac{1}{4\omega}\sin 2\omega t$, а

$$\int \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t dt = \frac{\sin(\omega_1 - \omega_2)t}{2(\omega_1 - \omega_2)} - \frac{\sin(\omega_1 + 3\omega_2)t}{2(\omega_1 - 3\omega_2)};$$

Запишемо:

$$U_{еф}^2 = \frac{1}{T}\left[U_1^2 \left(\frac{1}{2}t - \frac{1}{8\pi\nu_1}\sin 4\pi\nu_{1t} \right)\Bigg|_0^T + U_2 \left(\frac{1}{2}t - \frac{1}{24\pi\nu_1}\sin 12\pi\nu_1 t \right)\Bigg|_0^T + \right.$$

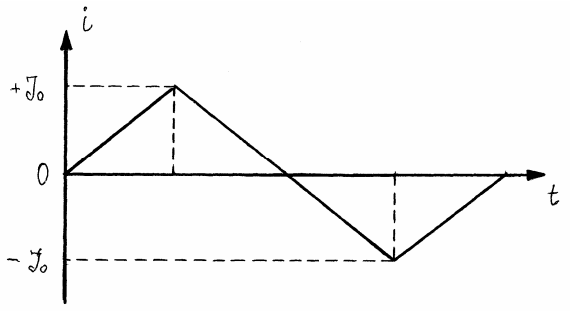
$$\left. + 2U_1U_2 \left(\frac{\sin(2\pi\nu_1 - 6\pi\nu_1)t}{2(2\pi\nu_1 - 6\pi\nu_1)} - \frac{\sin(2\pi\nu_1 + 6\pi\nu_1)t}{2(2\pi\nu_1 + 6\pi\nu_1)} \right)\Bigg|_0^T \right];$$

$$\text{Так як } \nu_1 = \frac{1}{T};\ \ \sin pn = 0$$

$$U_{еф}^2 = \frac{1}{T}\left[\frac{U_1^2}{2}T + \frac{U_2^2}{2}T \right] = \frac{U_1^2 + U_2^2}{2};\ U_{еф} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2}} \approx 121 \text{ (В)}.$$

Задача № 21.2.

Визначити співвідношення між максимальним, ефективним і середнім значенням сили змінного струму, якщо зміна сили струму відбувається так, як показано на графіку.



Розв'язок:

Ефективне і середнє значення сили струму може бути визначене за співвідношенням:

$$I_{еф}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt; \qquad I_{еф} = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i dt,$$

де T - період зміни струму,

i - миттєве значення струму.

Для розв'язку задачі необхідно знати закони зміни i, тобто формули, які описують закономірності зміни і протягом певного часу.

Під ефективним (діючим) значенням змінного струму розуміють таке миттєве значення, яке залишається незмінним в часі, приведе до виділення на одному і тому ж опорі таку ж кількість теплоти, що і змінний періодичний струм.

Можна вважати, що діюче значення періодичного змінного струму є одночасно середнім квадратичним значенням:

$$I_{еф}^2 T = \int_0^T i^2 dt; \qquad I_{еф} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}.$$

З малюнка видно, що і зміна *i* від *0* до максимального значення відбувається протягом *T*/3 за лінійним законом. Виходячи з наведених означень $I_{еф}$ запишемо:

$$I_{еф}^2 = \frac{3}{T}\int_0^{\frac{T}{3}} i^2 dt = \frac{3}{T}\int_0^{\frac{T}{3}} \left(\frac{3I_0 t}{T}\right)^2 dt = \frac{I_0^2}{3}.$$

Для визначення $I_{сер}$ можемо записати:

$$I_{сер} = \frac{I_0}{\sqrt{3}}, \quad I_{сер} = \frac{3}{T}\int_0^{\frac{T}{3}} \frac{3I_0}{T} t dt = \frac{I_0}{2}.$$

Задача № 21.3.

Визначити питомий опір діелектрика, який має діелектричну проникність $\varepsilon=2,8$ і використаний як ізолятор в конденсаторі. Конденсатор при частоті змінного струму $\nu=50Гц$ розсіює деяку потужність з коефіцієнтом потужності $\cos\varphi = 0,1$.

Розв'язок:

Позначимо даний струм $I_e = \frac{U}{X_e} = U\omega c$, а струм провідності в діелектрику $I_R = \frac{U}{R}$. Загальний струм в колі $I = \frac{U}{Z} = U\sqrt{1/R^2 + \omega^2 c^2}$.

Пам'ятаючи , що $\cos\varphi = \frac{P_a}{P_{пов}}$; $P_a = \frac{U^2}{R_a}$; $P_{пов} = \frac{U^2}{Z}$;

Запишемо $P_a = \frac{U^2}{R_a} = U^2\sqrt{1/R^2 + \omega^2 c^2}\cos\varphi$;

Підставивши $R = \rho\frac{d}{S}$; $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\xi}{4\pi d}$; $\omega = 2\pi\nu$;

Одержимо $\frac{1}{R_a} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 c^2} - \cos\varphi$; $\frac{S}{\rho d} = \sqrt{\frac{S^2}{\rho^2 d^2} + 4\pi^2\nu^2 \frac{\varepsilon^2\varepsilon_0^2 S^2}{16\pi^2 d^2 \cos\varphi}}$;

Звідси: $\rho = \frac{2}{\varepsilon\varepsilon_0\nu}\sqrt{\frac{1-\cos^2\varphi}{\cos^2\varphi}} = 1,28\cdot 10^{13}$ (Ом м).

Задача № 21.4.

Визначити амплітудні значення сили, що діє на мембрану телефону, при проходженні по обмотці котушок з магнітним осердям струму $I = I_0 \sin\omega t$, якщо амплітудне значення струму $I_0 = 2\times10^{-4}$ А індукція в повітряному прошарку між

мембраною і котушками при відсутності струму в обмотці $B_0 = 8\times10^{-2}$ Тл площа перетину кожного з магнітних наконечників $S = 15$ мм число витків в обмотці котушок $n = 400$ товщина повітряного проміжку d=0,2 мм

Розв'язок:

Сила притягання мембрани до полюсів магніту рівна:

$$F = \frac{S}{4\pi\mu}(B_0 + B)^2 = \frac{S}{4\pi\mu}\left(B_0^2 + 2B_0B + B^2\right),$$

Обмежитись при розгляді процесу лише двома складовими дії сил:

$$F = \frac{S}{4\pi\mu}\left(B_0^2 + 2B_0B\right) \qquad \text{тобто} \qquad F = F_{пост} + F_{змін}.$$

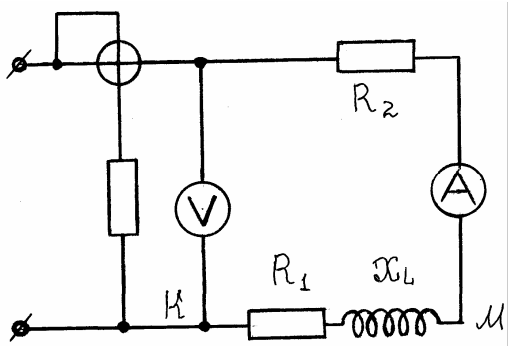
Оскільки нас цікавить лише змінна складова сили, так як вона є причиною коливань мембрани - запишемо: $F_{змін} = \frac{SBB_0}{2\pi\mu}$

Нехтуючи всіма іншими магнітними опорами, крім опору в повітряному прошарку визначимо B: $B = \frac{4\pi nI\mu}{2d}$

Звідси амплітудне значення сили $F_{змін}$: $F_{а.змін} = \frac{SB_0nI_0}{d} = 4{,}8\cdot10^{-4}$ (Н).

Задача № 21.5.

Вимірюючі прилади ввімкнені в коло змінного струму за схемою, зображеною на рисунку. Визначити величини опорів R_1 і X_L і побудувати векторну діаграму процесу. Визначити величину напруги на ділянці KM та зсув фаз φ, якщо покази ватметра – 940 Вт, вольтметра = 220 В, амперметра - 5 А, а R_2=22 Ом.



Розв'язок:

Для визначення величини розсіяної потужності на ділянках і КМ запишемо:

$$P_2 = I^2R_2 = 550 \text{ (Вт)} \quad P_1 = P - P_2 = 940 - 550 = 390 \text{ (Вт)}.$$

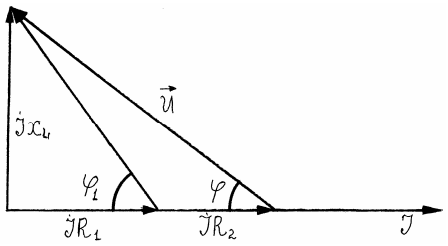
Оскільки розсіювання енергії відбувається на активному опорі, то значення R_1 може бути визначене за таким виразом:

$R_1 = \dfrac{P_1}{I_2} = 15{,}6$ Ом. Так як :

$P = IU\cos\varphi,\ \cos\varphi = \dfrac{P}{IU} = 0{,}855.$

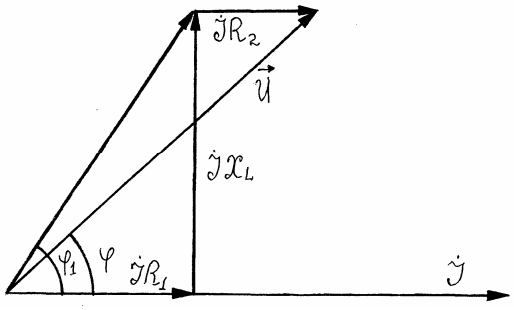
Знаючи, що $X_L = Z\cos\varphi,$ а $Z = \dfrac{U}{I},$

визначимо $X_L = \dfrac{U}{I}\cos\varphi = 22{,}8$ (Ом).



Щоб побудувати векторну діаграму, обчислимо спади напруг на активних і реактивних опорах: $I\,R_2$ =110 В, $I\,R_1$ =78 В, $I\,X_L$=114 В

Виберемо за горизонтальний напрямок вектор струму в колі. З його початку відкладемо значення спаду напруги на R_1 . З цієї ж точки побудуємо вектор спаду напруги на X_L. На продовженні вектора відкладемо вектор IR_2. Геометрична сума цих векторів є вектор, що з'єднує кінці цих векторів $\vec{I}\vec{X}_L$ і $(IR_1 + IR_2)$. Величина цього вектора є U. Для визначення зсуву фаз на ділянці KM, з'єднаємо кінці векторів IR_1 і IX_L.



Кут між сумарним вектором напруги на ділянці KM і вектором, що характеризує силу напруги на опорі R_1 визначає зсув фаз на ділянці KM.

Векторна діаграма може мати інший вигляд.

За такими векторними діаграмами можна розв'язувати і обернені задачі.

Задача № 21.6.

Трифазний споживач енергії, який має активний опір на кожній фазі становить R=8 Ом і індуктивний опір $X_L = 6$ Ом ввімкнено в мережу трифазного струму з лінійними напругами 380 В. Визначити напругу на кожній фазі і підвідних провідниках, якщо фази сполучені а) зіркою, б) трикутником.

Розв'язок:

Так як навантаження рівномірне обмежимося визначенням параметрів на одній фазі.

а) Якщо фази сполучені зіркою, то напруга на кожній фазі буде:

$$U_\phi = \frac{U_л}{\sqrt{3}},\ U_\phi = 220\,(\text{В}).$$

Такий опір кожної фази визначимо за формою:

$$Z_{\Phi} = \sqrt{R_{\phi}^2 + X_{L\phi}^2}$$

$$Z_{\phi} = 10 \text{ Ом}, \quad I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = 22 \text{ А}.$$

б) Якщо фази сполучені трикутником, то напруга на кожній фазі $U_{\phi} = U_{л} = 380\,\text{В}$.

А тому струм в кожній фазі: $I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = 38\,\text{А}$.

Струм в кожному лінійному провіднику: $I_{л} = \sqrt{3}\,,\ I_{\phi} = 66\ A.$

Практичне заняття № 22.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ.

Задачі, рекомендовані для розв'язку

в аудиторії: [5] 4.249 – 4.252, 4.264 – 4.267.

дома: [5] 4.253 – 4. 256, 4.258 – 4.263.

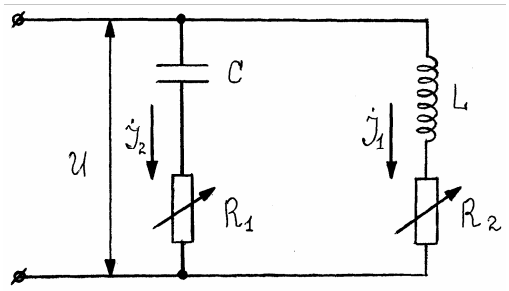
Задача № 22.1.

У контурі є $R_1 = R_2 = R$, які під'єднані послідовно до конденсатора *C*=50 мкФ і котушки індуктивності *L*=1,25 мГн. Опори змінюються одночасно і однаково. При якому значенні *R* настане резонанс струму при частоті $\nu = 1000$ Гц. Визначити струм у витках і нерозгалуженій частині кола, якщо напруга змінного струму 12 В.

Розв'язок:

З умови задачі зрозуміло, що коливальний контур є паралельним.

Зобразимо схему



Якщо $R_1 = R_2 = R$,то за умовою резонансу:

$$\frac{X_L}{R_2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R^2 + X_C^2};$$

$$\frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} = \frac{\omega C}{(R\omega C)^2 + 1}.$$

Звідси видно, що резонанс струмів настане при

$$R = R_{рез} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho\,.$$

Це співвідношення показує, що значення опорів при резонансі не залежить від частоти зовнішньої дії, а лише від активних параметрів контуру.

При частоті ν =1000 Гц $R_{рез} = 5$ Ом.

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi\nu L)^2}} \approx 1{,}35 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi\nu C}\right)^2}} = 2{,}0 \text{ А}.$$

Загальний струм в нерозгалуженій частині кола може бути визначений, як векторна сума $\vec{I}_1 + \vec{I}_2$ або через використання співвідношення, що для паралельного контуру $Z = \rho^2 / R$, де ρ характеристичний (хвильовий) опір кола:

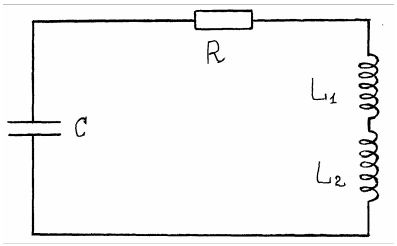
$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = 2{,}4 \text{ А. } I = \frac{U}{Z} = \frac{UR}{\rho^2} = \frac{120 \cdot 5}{25} = 2{,}4 \text{ А},$$

Його величина не залежить від частоти змінного струму.

Задача № 22.2.

Визначити період вільних коливань у контурі, який складається з послідовно сполучених конденсатора ємністю *C=10 мкФ* активного опору *R=20 Ом* і двох котушок з індуктивностями $L_1 = 0{,}2$ *мГн*, $L_2 = 0{,}4$ *мГн* і дуже малим опором. Розглянути випадки при послідовному і паралельному з'єднанні котушок індуктивності між собою.

Розв'язок:



а) Накреслимо схему, відповідає умові послідовного сполучення індуктивності елементів контуру.

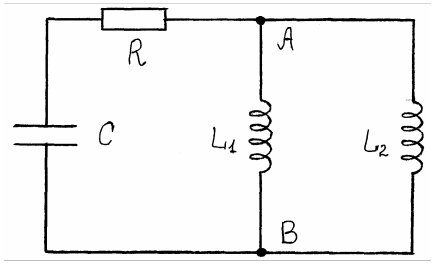
Період вільних коливань в контурі:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}};$$

При послідовному з'єднанні в обох котушках протікає однаковий струм, а тому ЕРС самоіндукції, які в них виникають, визначаються так:

$$\xi_1 = -L_1 \frac{dI}{dt};\ \xi_2 = -L_2 \frac{dI}{dt}.$$

Результуюча ЕРС є сумою двох складових: $\xi = \xi_1 + \xi_2 = -(L_1 + L_2)\frac{dI}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$,



де L - повна індуктивність контуру. Отже:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_2)C} - \frac{R^2}{4(L_1 + L_2)^2}}}$$

$$T \approx 1{,}68 \cdot 10^{-3} c.$$

б) накреслимо схему, що відповідає умові паралельного сполучення індуктивних елементів контуру.

Період вільних коливань в контурі:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2}}.$$

Нехай напруга між точками *A* і *B* в колі змінюється за законом:

$U = U_0 \sin \omega t$. Струм в нерозгалуженій частині кола $I = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$.

Тоді значення струму в котушках L_1 і L_2 можна записати:

$$I_1 = I_{01} \sin(\omega t - \varphi_1) \text{ і } I_2 = I_{02} \sin(\omega t - \varphi_2),\ \ I = I_1 + I_2.$$

Амплітудне значення цих струмів згідно закону Ома можна записати:

$$I_{01} = \frac{U_0}{\omega L_1};\ \ I_{02} = \frac{U_0}{\omega L_2}.$$

Струми, що протікають в кожній котушці відстають за фазою від прикладених напруги *U* на кути φ_1 і φ_2: $tg\varphi_1 = \frac{U_0}{\omega L_1},\ \ tg\varphi_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$

Оскільки за умовою активні опори котушок R_1 і R_2 дуже малі, то можна вважати, що

$tg\varphi_1 \approx tg\varphi_2 \to \infty$, тому : $\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$.

Отже, залежність I_1 і I_2 від часу можна записати в вигляді :

$$I_1 = \frac{U_0}{\omega L_1}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{U_0}{\omega L_1}\cos\omega t; \quad I_2 = -\frac{U_0}{\omega L_2}\cos\omega t.$$

В нерозгалуженій частині контуру струм *I* дорівнює:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U_0}{\omega}\left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right)\cos\omega t.$$

Порівнявши формули:

$I = I_{01}\sin(\omega t - \varphi_1) + I_{02}\sin(\omega t - \varphi_2)$ і $I = -\frac{U_0}{\omega}\left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right)\cos\omega t$

можна зробити висновок, що еквівалентна індуктивність системи:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} = L.$$

Підставивши це значення в вираз для періоду коливань, одержимо:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} + \frac{(L_1 + L_2)^2}{4L_1^2 L_2^2}}} \approx 1{,}45 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}$$

Задача № 22.3.

В коливальному контурі, що складається з активного опору *R*=4 кОм, котушки індуктивності *L*=0,01 Гн і конденсатора. Заряд конденсатора зменшується в 10 разів за період $T = 10^{-5}$ с. Визначити активний опір котушки індуктивності.

Розв'язок:

Заряд конденсатора в будь-який момент часу визначається за співвідношенням $Q = Ae^{-\alpha t}\cos(\omega t - \varphi)$ де $\alpha = \frac{R_n}{2L}$ *A*- стала, R_n- повний активний опір контуру. Через час, що дорівнює *T* :

$$Q_{t+T} = Ae^{-\frac{R_n}{2L}(t+T)}\cos[\omega(t+T) - \varphi].$$

Поділивши почленно вирази для моментів часу *t* і *t+T* одержимо:

$$\frac{Q_t}{Q_{t+T}} = e^{-\frac{R_n T}{2L}}\frac{\cos(\omega t - \varphi)}{\cos[\omega(t+T) - \varphi]},$$

Так як $\omega = \frac{2\pi}{T}$, а період зміни косинуса кутів дорівнює 2π одержимо:

$\frac{Q_t}{Q_{t+T}} = e^{\frac{R_n T}{2L}}$. Отже $R_n = \frac{2L}{T}\ln\frac{Q_t}{Q_{t+1}}$, $R_n \approx 4605$ Ом.

$$R_L = R_n - R = 605 \text{ Ом}.$$

Задача № 22.4.

Визначити хвильовий опір коаксіального кабелю, довжиною *l*, якщо по внутрішньому циліндричному провіднику тече струм *I*, магнітна проникність ізоляції μ, а ємність системи *C*. Радіуси внутрішнього і зовнішнього провідників R_1 і R_2 .

Розв'язок:

Як відомо, напруженість магнітного поля, створена струмом, що проходить в порожнистому провіднику (циліндрі), всередині циліндра дорівнює нулю.
Напруженість магнітного поля струму, що проходить в циліндричному провіднику, поза циліндром така ж, як напруженість поля створена лінійним струмом, що проходить по осі циліндра. Напруженість поля між циліндрами визначається лише струмом, що проходить по внутрішньому циліндру.
Отже, напруженість поля між циліндрами можна записати як:

$$H = \frac{I}{2\pi x},$$

де *x* є відстань від осі циліндра до точки визначення напруженості. Напруженість поля під обома циліндрами дорівнює нулю, так як є сумарною і створюється двома протилежними струмами однакової сили.
Щоб обчислити магнітний потік, розділимо площу осьового перерізу на нескінченну кількість вузьких смужок площею $dS = ldx$ тоді елементарний потік магнітної індукції через *dS* дорівнює: $d\text{Ц} = BdS = \mu\mu_0 \frac{Il}{2\pi x} dx$;

Отже : $\text{Ц} = \mu\mu_0 \frac{Il}{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dx}{x} = \mu\mu_0 \frac{Il}{2\pi} \ln\frac{R_2}{R_1}$. А звідси: $L = \frac{\text{Ц}}{I} = \mu\mu_0 \frac{l}{2\pi} \ln\frac{R_2}{R_1}$.

Таким чином:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu\mu_0 l}{2\pi C} \ln\frac{R_2}{R_1}}.$$

Задача № 22.5.
Випромінювання антени міської радіостанції має потужність ***N***=*100кВт*. Обчислити на відстанях $\boldsymbol{R_1}$=*1км* і $\boldsymbol{R_2}$=*100км* величину вектора Умова – Пойнтінга ***П***, напруженість електричного поля ***E***, напругу ***U***, яка виникає в приймальній антені радіоприймача завдовжки ***l***=*1м*, тиск електромагнітних хвиль ***p***.

Розв'язок:

Вектор Умова – Пойнтінга дорівнює потоку електромагнітної енергії крізь одиницю поверхні, тобто потужності випромінювання через одиницю поверхні:

$$П = \frac{N}{4\pi R^2}; \quad П_1 = 8\cdot10^{-3}\ (Вт/м^2); \quad П_2 = 8\cdot10^{-7}\ (Вт/м^2)$$

Величину напруженості електричного поля знайдемо виходячи з того, що потік електромагнітної енергії через одиницю поверхні дорівнює:

$$\boldsymbol{П = N/S = c\varepsilon_0\varepsilon E^2},$$

тут с – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі у вакуумі, $\boldsymbol{\varepsilon}$=*1*. Тоді:

$$E = \sqrt{\frac{\Pi}{c\varepsilon_0}};$$

$\boldsymbol{E_1}$=*1,74 (Вт/м)*;

$E_2=1{,}74\cdot10^{-2}$ *(Вт/м).*

Напруга (різниця потенціалів), яка виникає в приймальній антені завдовжки $l=1м$:

U=El;

U_1=1,74 (В);

$U_2=1{,}74\cdot10^{-2}$ (В).

Тиск електромагнітних хвильна поглинаючу поверхню:

p=П/c;

$p_1=2{,}7\cdot10^{-11}$ (Па);

$p_2=2{,}7\cdot10^{-15}$ (Па)

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО Розв'язування З ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ

1. Є два однакових сталевих стержня, один з яких намагнічений. Пояснити, як дізнатися, не користуючись іншими предметами, який з них намагнічений.

2. З однакових кусків дроту спаяний куб. До протилежних вершин куба по діагоналі прикладена ЕРС. Визначити, не враховуючи поля підвідних провідників, індукцію магнітного поля в центрі куба. (0).

3. По жорсткому дротяному кільцю діаметром 10 см і перерізом 5 мм^2 проходить струм 5 А. Площа кільця перпендикулярна до магнітного поля з індукцією 1 Тл. Визначити силу, яка діє на одиницю поверхні дроту.
(10^5 Па).

4. Між полюсами магніту на двох тонких вертикальних дротинах підвішений горизонтальний прямий провідник масою 10 г і довжиною 20 см. Напруга однорідного магнітного поля 0,25 Тл і напрямлена вертикально. Весь провідник міститься в магнітному полі. Визначити, на який кут від вертикалі відхиляться підвісні дротини, якщо по провіднику пропустити струм силою 2 А. ($\alpha=45^0$).

5. Електрони в телевізійній трубці мають енергію 12 кеВ. Трубка зорієнтована так, що електрони рухаються горизонтально з півдня на північ. Вертикальна складова земного магнітного поля напрямлена вниз, а його індукція становить $5{,}5\times10^{-5}$ Тл. В якому напрямку відхилиться електронний промінь? Яке прискорення кожного електрона? На скільки відхилиться пучок електронів, пролетівши 20 см всередині телевізійної трубки?

(на схід, $a=6{,}1\times10^{-14}$ м/с).

6. Розрахувати індукцію магнітного поля, в якому на провідник із струмом 20 А діє сила 0,05 Н. Довжина активної частини провідника 5 см. Напрям поля і струму взаємно перпендикулярні.

7. Яка сила взаємодії між проводами трамвайної лінії, розміщеними на відстані 3 м один від одного, якщо сила струму в кожному 700 А? Довжина взаємодіючих частин проводів 30 м.

8. Визначити магнітну індукцію поля в точці, яка знаходиться на відстані 5 м від прямолінійного провідника із струмом 800 А.

9. Визначити індукцію магнітного поля, якщо по вміщеній у нього рамці площею 5 $см^2$ проходить струм 2 А. Максимальний момент сили, що діє на рамку 0,03 Н м.

10. Визначити силу струму в рамці вміщеній в магнітне поле з індукцією 1 Тл, якщо максимальний момент сил, які діють на неї, 0,15 Н м. Площина рамки 10 $см^2$.

11. Визначити індукцію магнітного поля, в якому електрон, що має швидкість 4×10^6 м/с, описує коло радіусом 5 мм.

12. На провідник завдовжки 10 см у магнітному полі діє сила 2 Н. Визначити заряд, який проходить по провіднику за 0,5 хвилин, якщо індукція поля 0,2Тл.

13. Каркас із мідного дроту перерізом 2,8 $мм^2$ в формі трьох сторін квадрата підвішений до горизонтального шарніру і вміщений в вертикальне магнітне поле з індукцією 10 мТл. На який кут відхилиться каркас при струмі по ньому 50 А ? (45^0).

14. Частинка з зарядом 6,28 нКл і масою 10^{-4}мг, пройшовши різницю потенціалів, влітає в однорідне магнітне поле з індукцією 1 Тл. Вивести формулу розрахунку для періоду руху частинки і визначити його. (1 мс).

15. Електрон, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів 4,5 кВ, потрапляє в однорідне магнітне поле і рухається в ньому по гвинтовій лінії радіусом 30 см з кроком 8 см. Визначити індукцію магнітного поля. (Питомий заряд електрона становить $1{,}76\times10^{11}$ Кл/кг). (0,75 мТл).

16. Прямий провідник довжиною 10 см і масою 30 г підвішений горизонтально на двох нитках в магнітному полі вектор індукції якого напрямлений горизонтально і перпендикулярний до провідника. Який струм необхідно пропустити через провідник, щоб одна з ниток розірвалась ? Нитка розривається при натягу 0,2 Н. Індукція поля 0,2 Тл. (5 А)

17. Визначити довжину провідника, якщо відомо, що при рівномірному переміщенні його в магнітному полі індукцією 1,5 Тл на відстань 0,25 м в напрямку, перпендикулярному до поля і струму, при струмі по провіднику 10 А виконується робота 0,38 Дж. Вісь провідника утворює кут 30^0 з напрямком поля.

18. Стержень довжиною 2м рухається в магнітному полі з індукцією 0,1 Тл із швидкістю 5 м/с, перпендикулярно до осі стержня і ліній поля. Визначити різницю потенціалів на кінцях стержня. (1 В)

19. Прямокутна рамка із струмом розміщена в магнітному полі так, що її площа паралельна лініям магнітної індукції. На рамку діє обертовий момент 10^{-2}Н·м Визначити роботу сил магнітного поля при повертанні рамки на 30^0.
(5× 10-^{3}Дж).

20. Рамка гальванометра площею 1 см^2, що має 200 витків тонкого дроту, закріплена на пружному підвісі. Її площина паралельна лініям магнітної індукції. Індукція магнітного поля 15 мТл. На який кут повернеться рамка, якщо сила струму буде 7,5 мкА ? Визначити коефіцієнт підвісу.
($22{,}5^0$; 5,7×10-9 Нм/рад).

21. Циклотрон призначений для прискорення протонів до енергії 5 МеВ. Визначити найбільший радіус орбіти, по якій рухається протон, якщо індукція магнітного поля 10^4 Гс. (Потрібно врахувати, що на протон діє сила Лоренца $F=qBv$ і доцентрова сила $F=\frac{mv^2}{R}$)

22. У просторі існує однорідне магнітне поле з індуктивністю 0,2 Тл і перпендикулярне до нього електричне поле напругою 2×10^5 В/м. Яку швидкість матиме електрон, що рухається прямолінійно і перпендикулярно до обох полів ? (10^6 м/с).

23. Котушка опором 20 Ом та індуктивністю 10^{-2} Гн. вміщена в змінне магнітне поле. Який заряд пройшов по котушці, якщо створений цим полем магнітний потік, збільшившись на 10^{-3}Вт викличе зростання струму на 5×10^{-2}А ?
(2,5×10-Кл).

24. Через соленоїд проходить струм 2 А. Магнітний потік, що пронизує переріз соленоїда, становить 4 мкВт. Визначити індуктивність соленоїда, якщо він має 800 витків. (1,6 мГн).

25. Сила струму в котушці з індуктивністю 0,5 Тн змінюється за законом $i = 0{,}1 \cos 628\, t$. Визначити залежність напруги на котушці від часу та індуктивний опір. ($U = 31{,}4\sin(628 + \frac{\pi}{2})$; L_x=3,14 Ом).

26. Яку індуктивність повинна мати котушка, щоб в контурі з конденсатором ємністю 50 пФ виникли вільні коливання з частотою 10 МГц ? (5×10^{-6} Гн).

27. Діюче значення е.р.с. під час обертання рамки в магнітному полі дорівнює 14,4 В. Визначити миттєве значення е.р.с. через час, який дорівнює 1/12 періоду. Початкове е.р.с. дорівнює нулю. (10 В)

28. Визначити опір вторинної котушки трансформатора з коефіцієнтом трансформації 10, якщо при вмиканні первинної обмотки в коло напругою 120 В у вторинній обмотці проходить струм 5 А, а напруга на її кінцях 6 В. Втратами енергії в первинній обмотці нехтувати. (1,2 Ом).

29. Радіоприймач працює в діапазоні 7,5 - 15 м. Ємність конденсатора його коливального контуру може змінюватися від 50 до 600 пФ. Як змінюється індуктивність його котушки ? (1,25 - 0,026 мкГн).

30. Лампа і конденсатор увімкнені послідовно в освітлювальну мережу змінного струму. Як зміниться розжарювання лампи, якщо до конденсатора приєднати паралельно другий такий же конденсатор ?

31. Прискорений в електричному полі різницею потенціалів $1{,}5\times10^5$ В протон влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції і рухається рівномірно по колу радіусом 0,6 м. Визначити швидкість протона, модуль вектора магнітної індукції та силу, з якою поле діє на протон. ($5{,}4\times10^6$ м/с; $9{,}3\times10^{-2}$ Тл; 8×10^{-14} Н).

32. Короткозамкнена котушка з 10^3 витків вміщена в магнітне поле, напрямлене вздовж її осі. Площа поперечного перерізу котушки 40 см^2. Її повний опір

становить 160 Ом. Яка потужність виділяється у вигляді тепла, якщо індукція магнітного поля змінюється з швидкістю 10^{-3} Тл/с ? (10^{-7} Вт).

33. Первинна обмотка трансформатора має 1200 витків і під`єднана до мережі напругою 220 В. Скільки витків повинна мати вторинна обмотка, що використовується для розжарення ламп приймача, при струмі 3 А, опору нитки 0,5 Ом і спаді напруги на ній 5 В ?

(39 витків).

34. Як зміниться амплітуда ЕРС індукції в рамці, якщо кутова швидкість обертання рамки в магнітному полі збільшиться в 2 рази ?

(2 рази).

35. При рівномірному переміщенні провідника із струмом в 10 А в магнітному полі з індукцією 1,5 Тл на 0,25 м виконана робота 0,38 Дж. Вісь провідника з напрямом поля становить 30^0. Визначити довжину провідника. (0,2 м).

36. Визначити е.р.с. індукції в провіднику з довжиною активної частини 0,25 м, що рухається в магнітному полі індукцією 8 мТл з швидкістю 5 м/с, якщо вектор швидкості перпендикулярний до провідника і створює кут 60^0 з вектором магнітної індукції. (8,7 В).

37. Перпендикулярно до магнітного поля індукцією 10 мТл влітає електрон з кінетичною енергією 30 МеВ. Який радіус кривизни траєкторії електрона ?

(5,8 см).

38. Квадратна рамка з стороною 4 см і опором 2 Ом знаходиться в перпендикулярному магнітному полі індукцією 10 мТл. Який заряд пройде по рамці в наслідок відключення поля ?

(8 мкКл).

39. В однорідному магнітному полі розміщений виток опором 0,5 Ом і площиною 100 $см^2$. Площина витка утворює кут 60^0 з вектором індукції. За 0,5 с індукція поля зросла від 0,1 до 0,6 Тл. Визначити кількість теплоти, що виділиться за цей час.

(75 мкДж).

ЛІТЕРАТУРА

1. Загальна фізика. Програма навчальної дисциплінидля студентів вищих педагогічних закладів освіти/ М.І.Шут, І.Т.Горбачук, В.П.Сергієнко – К.: НПУ, 2005.-48 с.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: Навчальний посібник. –Т. 2.: Електрика і магнетизм. – К.: Техніка, 2001. – 452 с.
3. Січкар Т.Г. Електрика і магнетизм, Модуль № 1 Електростатика: Навчальний посібник – К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2004. – 109 с.
4. Січкар Т.Г. Електрика і магнетизм, Модуль № 2 Постійний струм: Навчальний посібник – К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2004. – 122 с.
5. Загальний курс фізики: Збірник задач/ І.П. Гаркуша, І.Т. Горбачук, В.П. Курінний та ін./ За заг.ред. І.П. Гаркуші. – К.: Техніка., 2003.– 560 с.
6. Загальний курс фізики. Збірник задач: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. – К.: Вища школа, 1993. – 359 с.
7. Шут М.І., Сташкевич О.М., Касперський А.В., Січкар Т.Г. Електрика і магнетизм. – К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2002. – 236 с.
8. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1985г. – 384с.
9. Сборник задач по общему курсу физики. Под ред. Цедрика М.С. – М.: Просвещение, 1989 г. – 271с.
10. Касперський А.В., Богданов І.Т. Електрика і магнетизм. Збірник задач, вправ і тестів. – К.: Четверта хвиля, 2006. – 248с.
11. Коршак Є.В., Гончаренко С.У., Коршак Н.М. Методика розв’язування задач з фізики. Практикум. – К.: Вища школа,1976. – 240с.
12. Сусь Б.А., Шут М.І. Проблеми дидактики фізики у вищій школі. – К.: ВЦ “Просвіта”, 2003. – 155с.
13. Гончаренко С.У., Ляшенко О.І. Основні поняття і закони фізики. – К.: Рад. школа, 1986. – 286с.
14. Шут М.І., Возний П.О. Фізика. Методичні поради та контрольні роботи. Навчально-методичний посібник. – К.: НПУ, 2003. – 101с.