

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання лабораторних робіт змістових
модулів «Основи молекулярної фізики і
термодинаміки», «Електрика і магнетизм» та
«Оптика та фізика мікрочастинок» з дисципліни
«Фізика»

Запоріжжя 2024



УДК 531/534(072)
М54

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол №1 від 27.09.2024 р.)

Укладач

Кайдан В.П., старший викладач

М54

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт змістових модулів «Основи молекулярної фізики і термодинаміки», «Електрика і магнетизм» та «Оптика та фізика мікрочастинок» з дисципліни «Фізика» (для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти) / уклад. В. П. Кайдан. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА». 2024. 71 с.

Методичні рекомендації містять відомості щодо виконання завдання лабораторних робіт змістових модулів «Основи молекулярної фізики і термодинаміки», «Електрика і магнетизм» та «Оптика та фізика мікрочастинок» та критеріїв оцінювання. Цей навчальний посібник призначений для поглиблення знань студентів у відповідній сфері, зокрема щодо засвоєння фундаментальних законів і принципів. Основна увага приділяється розвитку практичних навичок, необхідних для виконання лабораторних робіт, обробки отриманих даних і формулювання обґрунтованих висновків. Окрім цього, посібник сприяє підвищенню ефективності навчального процесу шляхом поєднання теоретичних знань із практичними завданнями. Він стимулює критичне мислення студентів, заохочуючи їх до самостійного аналізу та пошуку рішень, а також допомагає підвищити інтерес до предмета через використання інтерактивних методів і прикладного підходу до навчання. Рекомендовано для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

УДК 531/534(072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024



ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 Вимоги до виконання лабораторних робіт.....	6
2. Лабораторні роботи	8
Лабораторна робота №1 Вивчення законів протікання ізопроцесів.	8
Лабораторна робота №2 Вивчення поведінки реальних газів, рідин і твердих тіл.....	15
Лабораторна робота №3 Побудова електричних кіл постійного струму	25
Лабораторна робота №4 Ознайомлення та вивчення процесів магнітних явищ	34
Лабораторна робота №5 Побудова електричних кіл змінного струму	46
Лабораторна робота №6 Ознайомлення та вивчення законів геометричної оптики	62
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71



ВСТУП

Фізика — це наука, яка вивчає фундаментальні закономірності природи, досліджує властивості та структуру матерії, а також закони її руху. Її концепції та принципи є основою природничих наук. Як точна наука, фізика аналізує кількісні взаємозв'язки між явищами, забезпечуючи ґрунтовну теоретичну підготовку. Цей курс сприяє розвитку системного підходу до моделювання та прогнозування процесів у природних і технічних системах, допомагає аналізувати технічні рішення. Він стане ефективним інструментом для розуміння та управління роботою електромеханічних систем, що використовуються у сфері металургії та гірництва.

Під час навчання ви опануєте навички формалізації та розв'язання інженерно-технічних і прикладних наукових задач, що сприятиме формуванню інженерного мислення, зокрема з урахуванням аспектів безпеки праці на виробництві. Це забезпечить вам конкурентоспроможність на ринку праці, дозволить упевнено орієнтуватися в сучасних технологіях і перспективних напрямках їхнього розвитку, а також адаптуватися до нових викликів, професійного зростання й мобільності в суміжних галузях.

Методичні вказівки, представлені у цьому посібнику розроблені для забезпечення ефективного виконання лабораторних робіт, що входять до змістових модулів «Основи молекулярної фізики і термодинаміки», «Електрика і магнетизм» та «Оптика та фізика мікрочастинок» у межах курсу «Фізика». Вони спрямовані на розвиток у студентів практичних навичок і поглиблення теоретичних знань.

Лабораторні роботи відіграють ключову роль у навчальному процесі, оскільки допомагають студентам засвоїти теоретичні положення шляхом проведення експериментів. Виконання практичних завдань дає змогу досліджувати фізичні явища, проводити вимірювання фізичних величин



та аналізувати отримані результати, що сприяє кращому розумінню матеріалу та розвитку аналітичного мислення.

У методичних вказівках значну увагу приділено не лише класичним методам вимірювання та аналізу, а й використанню сучасних інформаційних технологій для обробки даних і моделювання фізичних систем. Це дає студентам змогу глибше усвідомити природу досліджуваних явищ і формує навички застосування інженерного підходу до розв'язання практичних завдань. Окрім цього, посібник сприяє розвитку логічного мислення, навичок роботи з науковими інструментами та матеріалами, а також вміння аналізувати й систематизувати отримані результати.

Навчання за цими методичними рекомендаціями допомагає студентам не лише оволодіти базовими знаннями, а й набути спеціалізованих компетенцій, необхідних для професійної діяльності у технічних сферах. Це також підвищує їхню конкурентоспроможність на сучасному ринку праці.



1 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторні роботи, передбачені цим курсом, виконуються у віртуальному навчальному середовищі на платформі Phet.colorado.edu. Оцінювання кожної роботи проводиться на основі звіту, який студенти завантажують у відповідний розділ платформи Moodle.

Максимальна оцінка залежить від точності виконаних розрахунків, логічної послідовності розв'язання задач, якості аналізу отриманих результатів, а в разі необхідності – від наявності геометричної ілюстрації.

Для успішного виконання лабораторних робіт у рамках курсу необхідно дотримуватися наступних вимог:

1. **Ознайомлення з теоретичним матеріалом:** Перед початком виконання лабораторної роботи студенти мають вивчити теоретичний матеріал, представлений у методичних рекомендаціях, а також детально ознайомитися з алгоритмом виконання завдання.

2. **Дотримання інструкцій:** Усі етапи лабораторної роботи необхідно виконувати згідно з інструкціями, наведеними в методичних рекомендаціях. Особливу увагу слід зосередити на правильному налаштуванні віртуального навчального середовища та коректному виборі параметрів для проведення експерименту.

3. **Коректність розрахунків:** Розрахунки, подані у звіті, повинні бути обґрунтованими, точними та містити необхідні пояснення. Для їхньої перевірки необхідно застосовувати рекомендовані формули та відповідні методи.

4. **Чіткість і логічність звіту:** Звіт повинен мати чітку структуру, включаючи основні етапи: формулювання завдання, опис методики виконання, розрахунки, аналіз отриманих результатів та висновки. За необхідності графіки, таблиці та ілюстрації слід супроводжувати відповідними підписами, щоб вони узгоджувалися зі змістом роботи.

5. **Дотримання технічних вимог:** Звіт повинен бути



підготовлений у текстовому редакторі та збережений у форматі .docx або .pdf. Він має бути завантажений у відповідний розділ платформи Moodle у встановлений термін.

6. **Самостійність виконання:** Усі роботи мають бути виконані індивідуально. Використання чужих матеріалів або автоматизованих рішень без узгодження з викладачем не допускається.

7. **Аналіз і висновки:** Особливий акцент робиться на аналітичній частині звіту. Студент повинен показати вміння аналізувати отримані результати, робити обґрунтовані висновки про спостережувані фізичні процеси та запропонувати можливі шляхи вдосконалення проведеного експерименту.

8. **Дотримання графіку роботи:** Роботи необхідно здавати вчасно, згідно з графіком, зазначеним у розділі «Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання».

9. **Оформлення та мова звіту:** Звіт має бути виконаний акуратно, без помилок, із дотриманням академічного стилю викладу. Використання зрозумілої технічної мови є обов'язковим.

10. **Повторна подача:** Якщо звіт потребує виправлення, студент може завантажити оновлений варіант без зниження максимальної оцінки, за умови, що це зроблено у встановлений строк.

Виконання цих вимог сприятиме якісному опрацюванню лабораторних робіт, поглибленню теоретичних знань та формуванню практичних навичок, важливих для майбутньої професійної діяльності.



2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота №1 Вивчення законів протікання ізопроцесів

Мета: Лабораторна робота спрямована на ознайомлення студентів із законами протікання ізопроцесів. Основна мета роботи полягає у вивченні математичних залежностей між тиском, об'ємом та температурою. Студенти мають навчитися вимірювати та аналізувати параметри, а також використовувати отримані дані для перевірки теоретичних положень з даної теми. Ця робота формує навички експериментального дослідження величин, розвиває вміння обробляти результати вимірювань, оцінювати похибки і формулювати висновки.

Обладнання:

Лабораторна робота виконується у віртуальному середовищі за допомогою симуляції «Властивості газів» на платформі [PhET Interactive Simulations](#). Для успішного виконання роботи необхідні наступні ресурси та обладнання:

1. Персональний комп'ютер або ноутбук
 - Операційна система: Windows, macOS, Linux.
 - Веббраузер: сучасна версія Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge або Safari.
2. Доступ до інтернету
 - Для завантаження та використання симуляції.
3. Симуляція «Властивості газів»
 - Інтерактивне середовище з можливістю моделювання різних параметрів (тиск, температура, об'єм, відстань, час, концентрація, маса молекул тощо).
4. Текстовий редактор
 - Для підготовки звіту (Microsoft Word, Google Docs або аналогічний).



5. Калькулятор

- Для проведення розрахунків під час обробки отриманих даних.

6. Методичні рекомендації

- Інструкція для виконання роботи із зазначенням мети, порядку дій, та формул для розрахунків.

7. Візуалізаційні інструменти

- Можливість будувати графіки залежностей за допомогою графічних програм або вбудованих засобів симуляції.

Цей набір ресурсів забезпечує зручне проведення експериментів, точний аналіз результатів і якісне виконання лабораторної роботи.

Хід і результати роботи:

1. Ознайомитись з наведеним теоретичним матеріалом за темою

Молекулярна фізика – це розділ фізики, який вивчає залежність будови і фізичних властивостей тіл від характеру руху і взаємодії між частинками, з яких складаються тіла. Теоретичним підґрунтям молекулярної фізики є молекулярно-кінетична теорія речовини, суть якої зводиться до таких основних положень: усі тіла складаються з молекул, які, у свою чергу, складаються з атомів; молекули перебувають у безперервному хаотичному русі; молекули взаємодіють між собою. У залежності від взаємного розташування, сил взаємодії і характеру теплового руху молекул речовини розрізняють газовий, рідинний і твердий агрегатні стани речовини.

Ідеальний газ – це теоретична модель, яку можна застосувати до реального газу, якщо задовольняються такі вимоги: власний об'єм молекул газу нехтовно малий порівняно з об'ємом посудини, в якій міститься газ; молекули газу взаємодіють лише при зіткненнях і не взаємодіють на відстані; зіткнення молекул газу одна з одною та зі стінками посудини абсолютно пружні, тобто при зіткненні кінетична енергія хаотичного руху молекул не перетворюється на які-небудь інші види енергії.



Тиск p – це скалярна величина, яка чисельно дорівнює нормальній складовій сили, з якою газ діє на одиницю площі поверхні посудини або якогось твердого тіла чи рідини.

Тиск газу

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_1 \overline{v^2}}{2}.$$

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів: тиск газу дорівнює $2/3$ сумарної кінетичної енергії поступального руху молекул одиниці об'єму газу.

Середня кінетична енергія молекул внаслідок малої маси молекули дуже маленька і користуватися цією величиною на практиці досить незручно. Тому замість неї запроваджують пропорційну їй величину, яку називають температурою T . І тоді основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів записується так:

$$p = nkT$$

де k – константа, яка називається сталою Больцмана.

Формулу основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів можна переписати у вигляді:

$$p = \frac{N}{V} kT,$$

де N – кількість молекул газу в посудині.

Одиниця кількості речовини $[v] = \text{моль}$ – це така кількість речовини, яка має стільки ж частинок, скільки молекул міститься в 12 г ізотопу вуглецю $^{12}_6\text{C}$. Отже, в одному молі будь-якої речовини міститься однакове



число молекул, яке називається числом Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Молярною масою речовини M називається маса одного моля речовини. Її можна знайти, поділивши масу речовини на кількість речовини:

$$M = \frac{m}{\nu}$$

Одиниця вимірювання молярної маси – кг/моль. Молярну масу в г/моль можна знайти, склавши взяті з періодичної системи елементів маси атомів, які входять до складу молекули.

Таким чином, кількість молекул газу в посудині

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A$$

З урахуванням цього рівняння перепишемо у вигляді:

$$pV = \frac{m}{M} N_A k T$$

Добуток констант N_A і k теж є константою, яка називається універсальною газовою сталою: $R = N_A k = 8,31$ Дж/(моль·К).

Скориставшись цією новою константою, з маємо:

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

$$pV = \nu RT$$

$$pV_M = RT$$

де $V_M = V/\nu$ – молярний об'єм, тобто об'єм, що припадає на один моль газу.



Процесом називається зміна стану газу. Ізопроцесами називаються процеси, в яких один із параметрів залишається незмінним. Закони ізопроцесів можна одержати, проаналізувавши рівняння стану ідеального газу.

Закон Бойля-Маріотта: для даної кількості газу в ізотермічному процесі ($T = \text{const}$) добуток тиску газу на його об'єм залишається сталим:

$$pV = \text{const.}$$

Закон Гей-Люссака: для даної кількості газу в ізобарному процесі ($p = \text{const}$) відношення об'єму до температури залишається сталим:

$$\frac{V}{T} = \text{const.}$$

Закон Шарля: для даної кількості газу в ізохорному процесі ($V = \text{const}$) відношення тиску даної кількості газу до його температури залишається сталим:

$$\frac{p}{T} = \text{const.}$$

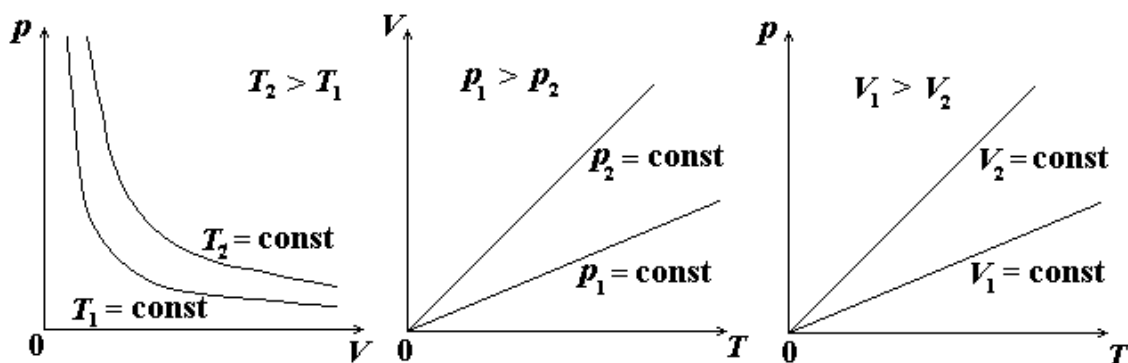


Рисунок 1.1 - Графіки ізотермічного, ізобарного та ізохорного процесів

2. Перейти за посиланням https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_all.html?locale=uk.
3. Запустити симуляцію та опрацювати можливі функції. Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання.

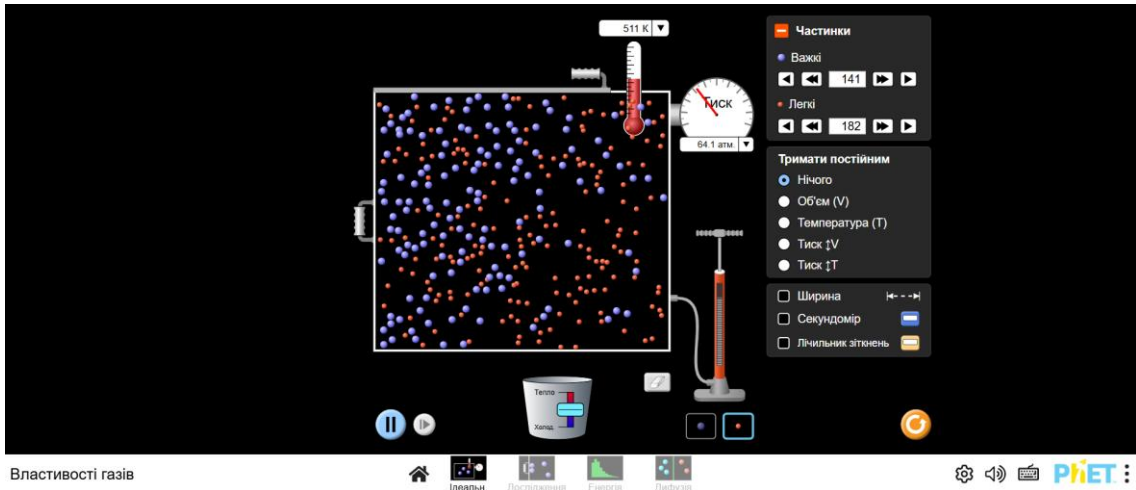


Рисунок 1.2 - Приклад скриншота виконання роботи

4. Встановити параметри симуляції згідно скриншота та виходячи із наданих параметрів за допомогою формул п. 1 зробити розрахунки та заповнити таблицю.

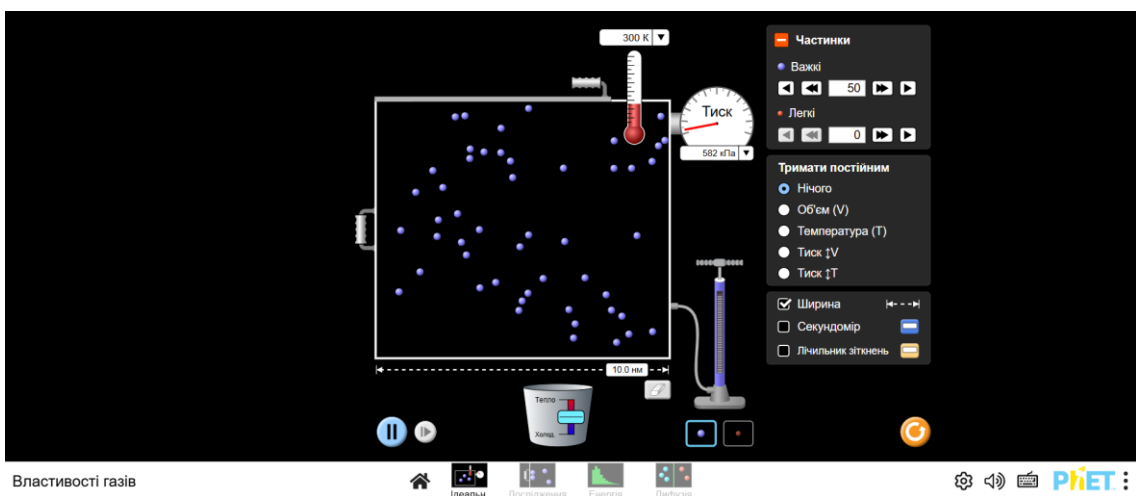


Рисунок 1.3 - Приклад зміни співвідношення між параметрами



Оскільки $pV = \nu RT$, то враховуючи, що об'єм $V = l \cdot S$, отримуємо співвідношення:


$$\frac{p l}{T} = const$$

Таблиця 1.1

№	l, нм	T, К	p, Па	const
1	10			
2	9			
3	8			
4	7			
5	6			
6	5			

5. Перевірити за допомогою симуляції результати розрахунків та підтвердити це за допомогою скриншотів екрану (один скриншот на один дослід), зробіть висновок.

6. Підготувати звіт та надати його для перевірки.



Лабораторна робота №2 Вивчення поведінки реальних газів, рідин і твердих тіл

Мета: Лабораторна робота спрямована на ознайомлення студентів із законами протікання фазових переходів. Основна мета роботи полягає у вивченні залежностей між макропараметрами та станом речовини. Студенти мають навчитися вимірювати та аналізувати параметри, а також використовувати отримані дані для перевірки теоретичних положень з даної теми. Ця робота формує навички експериментального дослідження величин, розвиває вміння обробляти результати вимірювань, оцінювати похибки і формулювати висновки.

Обладнання:

Лабораторна робота виконується у віртуальному середовищі за допомогою симуляції «Стани матерії» на платформі [PhET Interactive Simulations](#). Для успішного виконання роботи необхідні наступні ресурси та обладнання:

1. Персональний комп'ютер або ноутбук
 - Операційна система: Windows, macOS, Linux.
 - Веббраузер: сучасна версія Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge або Safari.
2. Доступ до інтернету
 - Для завантаження та використання симуляції.
3. Симуляція «Стани матерії»
 - Інтерактивне середовище з можливістю моделювання різних параметрів (тиск, температура, агрегатні стани, відстань тощо).
4. Текстовий редактор
 - Для підготовки звіту (Microsoft Word, Google Docs або аналогічний).
5. Калькулятор
 - Для проведення розрахунків під час обробки отриманих даних.



6. Методичні рекомендації

- Інструкція для виконання роботи із зазначенням мети, порядку дій, та формул для розрахунків.

7. Візуалізаційні інструменти

- Можливість будувати графіки залежностей за допомогою графічних програм або вбудованих засобів симуляції.

Цей набір ресурсів забезпечує зручне проведення експериментів, точний аналіз результатів і якісне виконання лабораторної роботи.

Хід роботи:

1. Ознайомитись з наведеним теоретичним матеріалом за темою Критичною температурою T_k називається максимальна температура, за якої газ можна перетворити на рідину ізотермічним стисненням. Чим вище температура насиченої пари, тим вище її тиск $p_{\text{нп}}$.

Рівняння стану ідеального газу

$$pV_M = RT$$

не можна застосовувати до реальних газів при низьких температурах і високих тисках, бо розрахунки за цією формулою дають результати, які дуже відрізняються від експериментальних. Результати, які досить добре узгоджуються з експериментом, дає рівняння Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{V_M^2}\right)(V_M - b) = RT$$

де a і b – сталі, що залежать від виду газу.

Будь-який газ при температурі, нижчій від критичної, можна розглядати як насичену пару відповідної рідини. Така пара перетворюється на рідину шляхом підвищення тиску. Критична



температура T_K більшості газів низька. Тому способи зрідження газів зводяться насамперед до досягнення низьких температур.

За властивостями і структурою рідина займає проміжне місце між газами і твердими тілами. З одного боку, рідина подібно до газів не має власної форми, а набуває форми посудини; вона тече, характеризується в'язкістю. При критичних температурі і тиску різниця між рідиною і газом взагалі зникає. Рівняння Ван-дер-Ваальса для реальних газів у першому наближенні можна застосувати і до рідин. З іншого боку, рідина за деякими характеристиками близька до твердих тіл. Майже однакові значення густини речовини в рідкому і твердому станах; мало різняться їх теплоємності та коефіцієнти об'ємного стиску; рідина подібно до твердого тіла виявляє міцність на розрив, може перебувати в розтягнутому стані.

Головна відмінність рідини від газу полягає в тому, що вона займає обмежений об'єм; головна відмінність рідини від твердого тіла - текучість рідини. Якою ж є структура рідини?

Як відомо, в газах відстані між молекулами хаотично і безладно змінюються, тоді як атоми або молекули твердого тіла упорядковуються в кристалічну решітку, у великих об'ємах твердого тіла спостерігається строга дистанційна повторюваність розміщення молекул. Кажуть, що твердим тілам притаманний дальній порядок у розміщенні молекул. Рідина, як проміжний стан між газом і твердим тілом, в своїй структурі певною мірою відображає і безладність, і порядок. Аналіз дослідних даних дає підстави твердити, що в рідинах існує ближній порядок молекул. Це означає, що в окремих мікрооб'ємах рідини кілька десятків молекул утворюють структуру, подібну до кристалічної. Молекула рідини порівняно довго (~ 100 пс) здійснює теплові коливання, перебуваючи у вузлі такої тимчасової, дуже нестійкої і дуже обмеженої в просторі кристалічної структури. За цей час вона встигає виконати біля сотні коливань, після чого, отримавши імпульс при зіткненні з сусідньою молекулою, перестрибує в нове тимчасове рівноважне положення. Таким чином, для



рідини характерні і порядок (ближній порядок), і безладність у розміщенні молекул.

Пароутворенням називають процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний. При будь-якій температурі в рідині, згідно з розподілом Максвелла, є молекули, кінетична енергія яких достатня для того, щоб перебороти молекулярні сили, що діють у поверхневому шарі, і покинути рідину. Пароутворення, яке відбувається при будь-якій температурі з вільної поверхні рідини, називають випаровуванням. З поверхневого шару рідини вилітають молекули, які мають найбільшу швидкість і кінетичну енергію теплового хаотичного руху. Тому в процесі випаровування рідина охолоджується.

Мірою інтенсивності процесу пароутворення є швидкість пароутворення – кількість рідини, яка перетворюється в пару за одиницю часу з одиниці площі поверхні рідини. Швидкість пароутворення залежить від температури рідини, зовнішнього тиску й інтенсивності руху газоподібної фази над вільною поверхнею рідини (від вітру). Кипінням називають процес інтенсивного пароутворення не лише з вільної поверхні, але й в усьому об'ємі рідини всередину утворюваних при цьому бульбашок пари.

З макроскопічної точки зору, тобто якщо не цікавитися внутрішньою будовою, твердим тілом у механіці називають таке тіло, яке зберігає свою форму. З мікроскопічної точки зору, тобто з огляду на внутрішню будову, під твердим тілом розуміють кристалічне тіло, тобто таке, в якому розміщення молекул періодично повторюється по всій довжині кристала, або, як кажуть, існує дальній порядок у розміщенні молекул.

Саме наявність дальнього порядку відрізняє кристалічні тіла від рідин. Завдяки наявності дальнього порядку кристалічним тілам притаманна анізотропність. Цей термін означає, що фізичні властивості кристалів не однакові в різних напрямках.

Монокристал – це тіло, молекули якого утворюють єдину просторову



решітку. Анізотропія в такій структурі повинна виявлятися хоча б тому, що в просторовій решітці в різних напрямках на однакові відрізки прямої припадає різна кількість молекул. По деяких площинах, які називають площинами спайності, монокристал (наприклад, кам'яної солі) можна легко розколоти, тоді як по інших площинах міцність кристалів на зсув може бути значною. У кристалах є напрями найбільшої і найменшої пружності, напрями різної теплопровідності тощо. Візерунки на замерзлих вікнах виникають саме внаслідок анізотропії теплопровідності кристаликів льоду.

У деяких кристалічних тілах, наприклад у металах, анізотропність не виявляється тому, що таке тіло являє собою моноліт, складений з безлічі безладно орієнтованих дрібних кристаликів – так званих кристалітів, або зерен розміром 0,1 ... 1 мкм. Такі тіла називають полікристалами.

Рідкі кристали – це специфічний стан речовини, якому властиві риси як рідини, так і кристала. З одного боку це рідини, бо вони течуть. З іншого боку це кристали, бо їм притаманна анізотропія властивостей. До рідких кристалів належать речовини з молекулами, що мають вигляд паличок або пластинок, а також розчини деяких речовин, наприклад, мила у воді. У межах значного об'єму рідкого кристалу молекули мають однакову орієнтацію, чим і обумовлюється анізотропія оптичних та деяких інших властивостей. Взаємне ж розташування молекул, як і у звичайних рідинах, далекого порядку не виявляє.

У стані рідкого кристала речовина може перебувати лише в певному температурному інтервалі. Нижня межа температурного інтервалу існування рідинно-кристалічного стану відповідає перетворенню у твердий кристал. З підвищенням температури анізотропія рідких кристалів поступово зменшується, бо зменшується орієнтаційна впорядкованість молекул. При температурі, яка відповідає верхній межі температурного інтервалу існування рідкокристалічного стану, орієнтаційна впорядкованість молекул зникає зовсім.



Прикладаючи до рідкого кристалу електричне або магнітне поле, можна досягти значної одновісної впорядкованості рідкого кристалу. Можна також змінювати напрям осі, вздовж якої зорієнтовані молекули.

Розглянемо процес плавлення кристалічного тіла, виходячи з його внутрішньої структури. Впорядковане розміщення частинок у кристалах відповідає мінімуму їх потенціальної енергії. Тому перехід до рідкого стану супроводжується збільшенням внутрішньої енергії речовини. Спочатку з міру нагрівання тіла кінетична енергія його частинок зростає, але залишається недостатньою для подолання зв'язків між ними в кристалічній решітці. Коли ж досягається температура плавлення, кінетична енергія частинок тіла стає достатньою для руйнування кристалічної решітки. З цього моменту вся теплота, яку дістає тіло, витрачається на руйнування кристалічної решітки і відповідне збільшення потенціальної енергії частинок тіла. Тому температура тіла залишається сталою, доки воно повністю не розплавиться. Після цього знову теплота, яку дістає тіло, витрачається на збільшення кінетичної енергії частинок, температура тіла підвищується.

Якщо в процесі плавлення припинити підведення теплоти ззовні, то плавлення припиниться, і при тій самій температурі рідина і тверде тіло перебуватимуть у динамічній рівновазі: скільки молекул перейде з твердого стану в рідкий, стільки ж повернеться з рідкого у твердий.

Аморфне тіло в міру підвищення температури поступово розм'якшується і переходить у рідину. У цьому процесі температура речовини зростає. Аморфне тіло не має певної температури плавлення, не можна назвати якусь певну температуру, нижче якої речовина перебуває у твердому стані і вище якої – у рідкому. Ми маємо справу з дуже в'язкою рідиною, в'язкість якої не стрибком, а поступово зменшується в процесі підвищення температури. Поглинута тілом теплота йде на збільшення кінетичної енергії молекул. Тому-то температура тіла в процесі підведення тепла безперервно зростає.



Процес переходу рідкої фази в тверду називається кристалізацією. Кристалізація тіла під незмінним тиском починається при тій самій температурі, при якій тіло плавилось. Правда, для цього повинні бути зародки кристалізації у вигляді дрібних кристаликів. Якщо таких зародків немає, тверднення часто затримується. Так, при швидкому охолодженні розплаву скла рухомість молекул зменшується настільки швидко, що вони стають не в змозі перебудуватися в кристалічну решітку, і речовина переходить в аморфний стан. При дуже повільному охолодженні розплав скла може кристалізуватися. Так само дуже швидким охолодженням розплаву можна одержувати метали в аморфному стані.

Процес кристалізації пов'язаний із зменшенням внутрішньої енергії тіла, тому, щоб він відбувся, від тіла треба відводити теплоту.

При будь-якій температурі тверді тіла можуть також випаровуватися. Перетворення твердого тіла безпосередньо в газоподібний стан, минаючи рідку фазу, називають сублімацією. Легко можна спостерігати випаровування кристаликів йоду в пробірці, нафталіну та інших «пахучих» твердих тіл. Висихання білизни на морозі пояснюється випаровуванням льоду. Процес сублімації супроводжується поглинанням певної кількості теплоти.

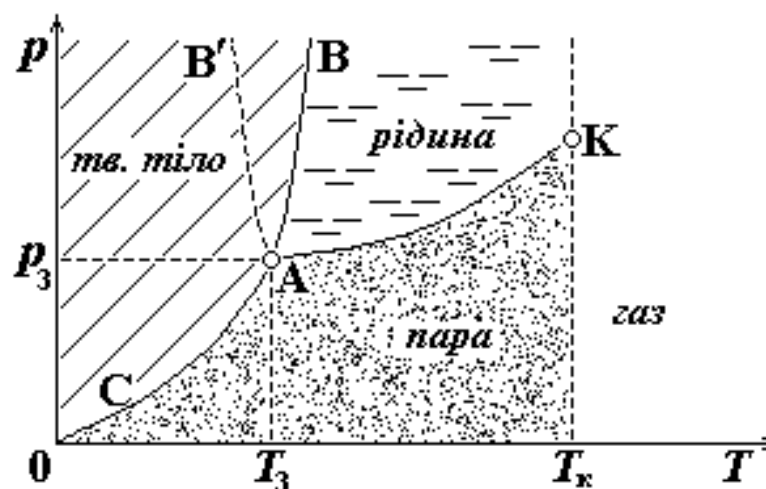


Рисунок 2.1 - Діаграма стану



Фазові перетворення зображаються діаграмою стану, на якій у координатах p , T будується залежність між температурою фазового переходу і тиском у вигляді кривих рівноваги між рідиною і насиченою парою (АК), між рідиною і твердим тілом (АВ), між твердим тілом і насиченою парою (АС). Точка К відповідає критичному станові. Як відомо, при температурах, вищих за критичну, речовина не може перебувати в рідкому стані. Точкам, що лежать між кривою АВ і прямою $T = T_K$, вище кривої АК, відповідає рідкий стан. Точкам, що лежать ліворуч від САВ, відповідає твердий стан. Точкам, що лежать нижче від САК, відповідає газоподібний стан. Точка А відповідає рівновазі трьох фаз речовини: твердої, рідкої і газоподібної. Її називають потрійною точкою.

2. Перейти за посиланнями, запустити симуляцію та опрацювати можливі функції. Додайте до звіту скріни (по 2 на симуляцію), що підтверджують виконання завдання:
https://phet.colorado.edu/sims/html/states-of-matter/latest/states-of-matter_all.html

3. Розглянути можливі сценарії зміни агрегатного стану речовини в процесі нагрівання.

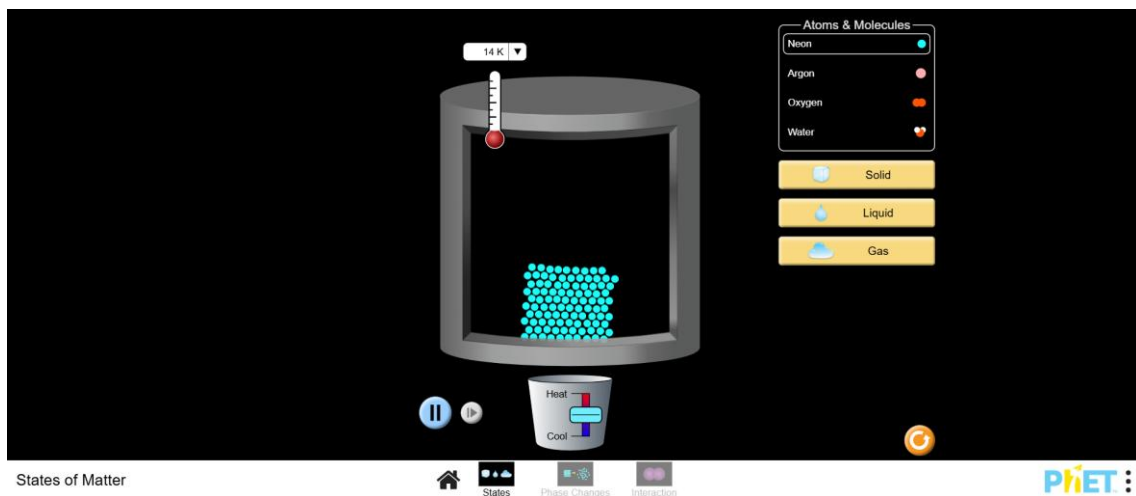


Рисунок 2.2 - Приклад моделювання зміни агрегатного стану

Опрацювати симуляцію за двома різними речовинами. Додати скриншоти виконання. Зробити висновки.

4. Розглянути можливі сценарії фазових переходів. Звернути увагу на зміну відстаней між молекулами.

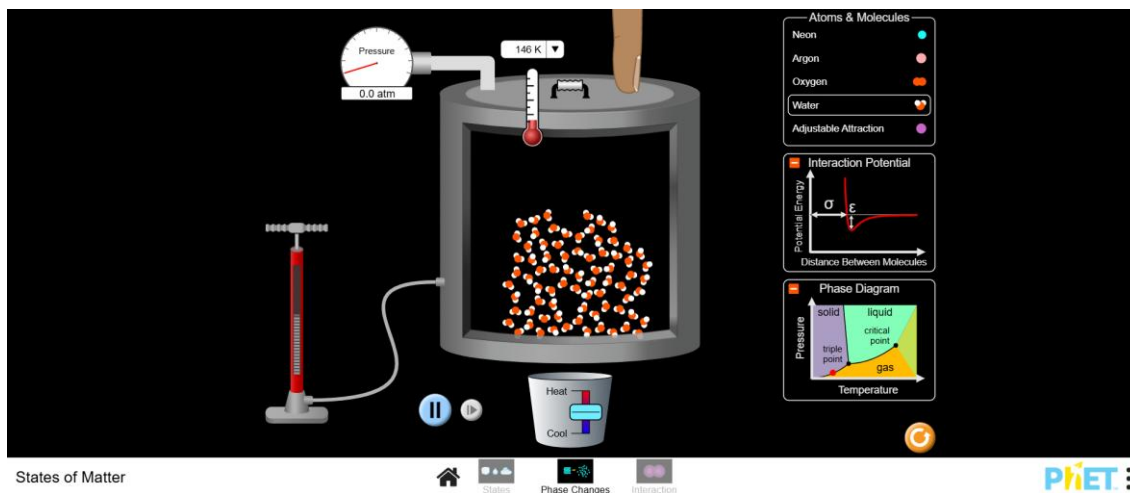


Рисунок 2.3 - Приклад моделювання переходів між агрегатними станами

Опрацювати симуляцію за двома різними речовинами. Додати скриншоти виконання. Зробити висновки.

5. Розглянути сили міжмолекулярної взаємодії.

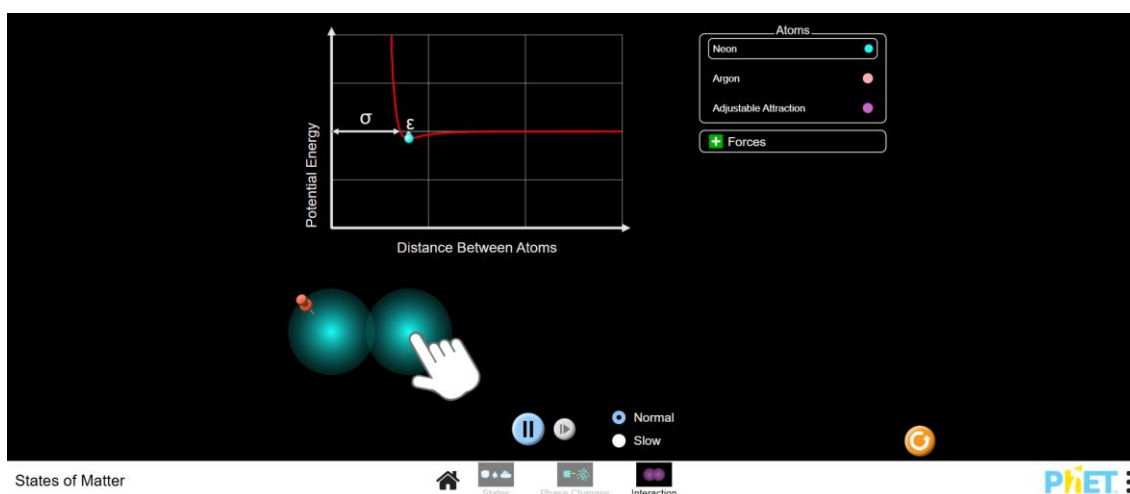


Рисунок 2.4 - Приклад моделювання взаємодії між атомами



Опрацювати симуляцію за двома різними речовинами. Додати скриншоти виконання. Зробити висновки.

6. Розглянути процес дифузії перейшовши за посиланням:
https://phet.colorado.edu/sims/html/diffusion/latest/diffusion_all.html

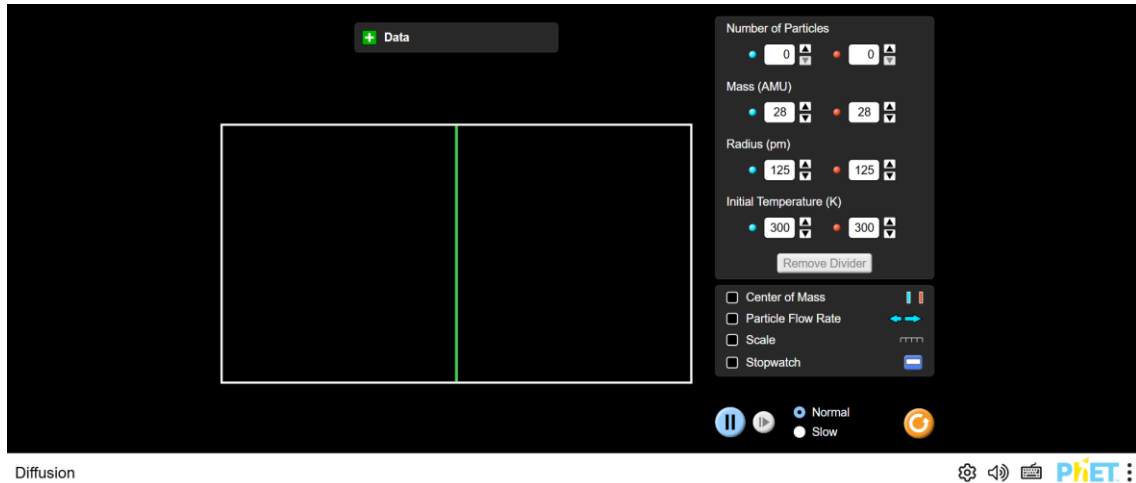



Рисунок 2.5 - Приклад початкових умов для моделювання дифузії

Опрацювати симуляцію для різних кількостей молекул, різних мас молекул, розмірів молекул та температур. Додати скриншоти виконання. Зробити висновки щодо протікання процесу дифузії та впливу на нього зовнішніх факторів.

7. Підготувати звіт та надати його для перевірки.



Лабораторна робота №3 Побудова електричних кіл постійного струму

Мета: Лабораторна робота спрямована на ознайомлення студентів із законами протікання постійного електричного струму. Основна мета роботи полягає у вивченні математичних залежностей між опором, напругою та силою струму. Студенти мають навчитися вимірювати та аналізувати параметри, а також використовувати отримані дані для перевірки теоретичних положень з даної теми. Ця робота формує навички експериментального дослідження величин, розвиває вміння обробляти результати вимірювань, оцінювати похибки і формулювати висновки.

Обладнання:

Лабораторна робота виконується у віртуальному середовищі за допомогою симуляції «Лабораторія електрики: постійний струм» на платформі [PhET Interactive Simulations](#). Для успішного виконання роботи необхідні наступні ресурси та обладнання:

1. Персональний комп'ютер або ноутбук
 - Операційна система: Windows, macOS, Linux.
 - Веббраузер: сучасна версія Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge або Safari.
2. Доступ до інтернету
 - Для завантаження та використання симуляції.
3. Симуляція «Лабораторія електрики: постійний струм»
 - Інтерактивне середовище з можливістю моделювання різних параметрів (опір, елементи кола, напруга тощо).
4. Текстовий редактор
 - Для підготовки звіту (Microsoft Word, Google Docs або аналогічний).
5. Калькулятор
 - Для проведення розрахунків під час обробки отриманих даних.



6. Методичні рекомендації

- Інструкція для виконання роботи із зазначенням мети, порядку дій, та формул для розрахунків.

7. Візуалізаційні інструменти

- Можливість будувати графіки залежностей за допомогою графічних програм або вбудованих засобів симуляції.

Цей набір ресурсів забезпечує зручне проведення експериментів, точний аналіз результатів і якісне виконання лабораторної роботи.

Хід роботи:

1. Ознайомитись з наведеним теоретичним матеріалом за темою

Напрямленим потік носіїв заряду у вакуумі або речовині називають електричним струмом провідності, або просто електричним струмом. Залежно від типу носіїв заряду в речовині розрізняють електронний та іонний механізми провідності. Всі метали, в яких електричний струм створюється напрямленим рухом вільних електронів, мають електронний механізм провідності. До речовин з електронним механізмом провідності належать також усі напівпровідникові матеріали, які використовуються в сучасній техніці для виготовлення діодів, транзисторів та інших приладів. Іонний механізм провідності мають усі електроліти, як рідкі, так і тверді (наприклад, кристали хлористого натрію). Характерною ознакою іонної провідності є перенесення речовини між електродами при проходженні постійного струму. Зрозуміло, що речовина електроліту при цьому розкладається. Через це тверді напівпровідники з іонним механізмом провідності в сучасній техніці для виготовлення радіотехнічних приладів не використовують. Електропровідність, зумовлену напрямленим рухом вільних електронів та іонів, називають мішаною. Мішану провідність має, зокрема, плазма.

Для кількісної оцінки електричного струму запроваджено поняття про величину, або силу струму. Нехай за нескінченно малий проміжок часу dt через поперечний переріз провідника переноситься електричний заряд



dq . Тоді величина струму

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Величиною струму називається скалярна фізична величина, яка вимірюється кількістю електрики, що переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу. Якщо за однакові проміжки часу через довільні перерізи провідника переносяться однакові кількості електричного заряду, то такий струм називається постійним (за величиною і напрямом). Тоді

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

де q – заряд, що переноситься через переріз S за час t . Одиниця величини струму $[I] = \text{Кл/с} = \text{А}$ (ампер). Оскільки заряд q і час t – скаляри, то й величина струму – скалярна величина.

Історично склалось так, що за напрям електричного струму умовно прийняли напрям руху позитивних електричних зарядів, хоч у металевих провідниках електричний струм створюється рухом електронів у протилежному напрямі. Хоч струм має напрям, але він не є векторною величиною бо струми не можна додавати як вектори, тобто за правилом паралелограма.

В електродинаміці доводиться користуватись поняттям вектора густини струму. Цей вектор збігається з напрямом струму і вимірюється електричним зарядом, що проходить за одиницю часу через одиничну площинку, перпендикулярну до напрямку струму, тобто

$$j = \frac{dq}{dS \cdot dt} = \frac{dI}{dS}$$

Якщо провідник однорідний і струм рівномірно розподіляється по



всьому перерізу, то

$$j = I/S$$

Візьмемо однорідний циліндричний провідник довжиною l і поперечним перерізом S . Нехай в одиниці об'єму цього провідника буде n елементарних зарядів (густина зарядів). Тоді заряд в об'ємі провідника дорівнюватиме $q = enSl$, і густина струму

$$j = \frac{I}{S} = \frac{q}{St} = \frac{tnSl}{St} = env$$

де $v = l/t$ – середня швидкість упорядкованого руху носіїв струму, e – елементарний заряд. Вектор густини струму $\vec{j} = en\vec{v}$ (для негативних носіїв $\vec{j} = -en\vec{v}$). Одиниця вимірювання густини струму $[j] = A/m^2$.

Німецький фізик Георг Ом у 1827 р. експериментально довів, що сила струму I в провіднику прямо пропорційна напрузі U на його кінцях:

$$I = GU.$$

Коефіцієнт пропорційності G називають електричною провідністю провідника. Він залежить від розмірів провідника, матеріалу, з якого виготовлено провідник, і умов, у яких він перебуває (температура, механічне напруження тощо). Одиниця вимірювання електропровідності – $[G] = A/V = \text{См}$ (сименс). На практиці частіше користуються оберненою до електропровідності величиною, яку називають опором провідника і позначають літерою R . Таким чином,

$$R = 1/G.$$

Одиниця вимірювання опору $[R] = V/A = 1/\text{См} = \text{Ом}$. Тоді закон Ома можна записати ще й так:



$$I = U/R.$$

Опір однорідного провідника з незмінним перерізом прямо пропорційний його довжині l і обернено пропорційний площі поперечного перерізу S , тобто

$$R = \rho l/S,$$

де ρ – коефіцієнт пропорційності, який називається питомим опором матеріалу. Величина, обернена до питомого опору,

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

називається питомою провідністю. Одиниця вимірювання питомого опору $[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$, одиниця вимірювання питомої провідності $[\gamma] = \text{См/м}$.

Електричний струм виконує на будь-якій ділянці кола певну роботу. Візьмемо довільну ділянку кола, між кінцями якої існує напруга U . За означенням електричної напруги робота, яка виконується при переміщенні одиниці заряду між кінцевими точками ділянки кола, дорівнює U . Якщо величина струму на ділянці кола дорівнює I , то за час t через поперечний переріз проводу пройде заряд It , і тому робота електричного струму на цій ділянці дорівнюватиме:

$$A = UIt$$

Якщо виділена ділянка кола містить електродвигун, то робота струму пов'язана з перетворенням енергії джерела струму на механічну енергію. Якщо ж ця ділянка містить електролітичну ванну, то відбуваються хімічні зміни і електрична енергія перетворюється на внутрішню (хімічну). Крім того при зіткненнях носіїв струму з атомами частина електричної енергії перетворюється на теплову.



Якщо величина струму визначається законом Ома (в нерухомому металевому провіднику), то з урахуванням закону Ома можна знайти кількість теплоти, виділеної на ділянці кола

$$Q = IUt = I^2Rt = U^2t/R$$

Ця формула виражає закон Джоуля-Ленца, до якого незалежно один від одного експериментально прийшли Джоуль і Ленц.

Потужність струму, тобто робота за одиницю часу, дорівнює

$$P = A/t = UI = I^2R = U^2/R$$

Одиниця потужності [P] = Вт , одиниця роботи [A] = Дж. Оскільки Дж = Вт·с, то роботу в один джоуль називають ще ват-секундою. Користуються також такими одиницями, як ват-година (3600 Дж) і кіловат-година (3,6 МДж).

В електротехніці та радіотехніці використовують спеціальні елементи електричного кола, які мають великий опір при невеликих розмірах. Такі елементи називають резисторами. Це може бути, наприклад, довгий тонкий дріт із матеріалу з великим питомим опором, намотаний на керамічний циліндр і вкритий захисною фарбою. На схемах резистор зображується довгастим прямокутником. Опір провідників, що з'єднують резистори та інші елементи кола, порівняно малий і його звичайно не беруть до уваги.

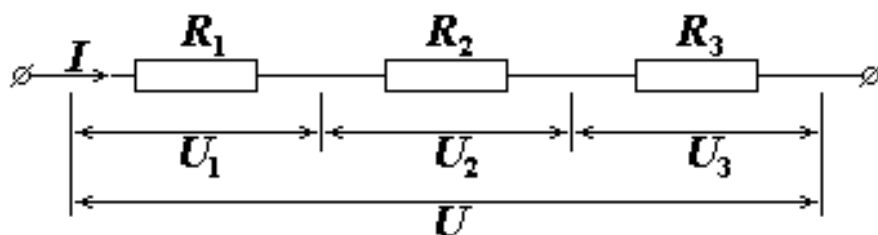


Рисунок 3.1 - Послідовне сполучення провідників



При послідовному сполученні провідників (резисторів) з опорами R_1 , R_2 , R_3 , ... через всі провідники тече однаковий струм I . Напряга на кінцях ділянки кола дорівнює сумі напруг на окремих провідниках:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots) = IR$$

Звідси робимо висновок, що повний опір ділянки кола при послідовному сполученні провідників (резисторів) дорівнює сумі опорів окремих провідників (резисторів).

При паралельному сполученні провідників (резисторів) з опорами R_1 , R_2 , R_3 , ... напряга U на всіх провідниках однакова. Величина струму I в нерозгалужених кінцевих ділянках дорівнює сумі струмів через провідники з опорами R_1 , R_2 , R_3 , ..., тобто:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3 + \dots = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \right) = \frac{U}{R}$$

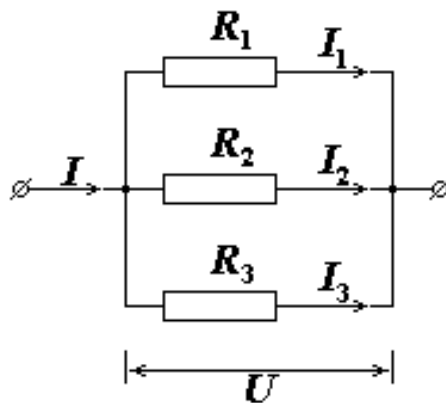


Рисунок 3.2 - Паралельне сполучення провідників

Таким чином, повний опір R паралельно сполучених провідників (резисторів) можна знайти з формули

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$



Або ж

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

Тобто електропровідність G паралельно сполучених провідників (резисторів) дорівнює сумі їх електропровідностей G_1, G_2, G_3, \dots

2. Перейти за посиланням

https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc/latest/circuit-construction-kit-dc_all.html?locale=uk.

Запустити симуляцію та опрацювати можливі функції. Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання.

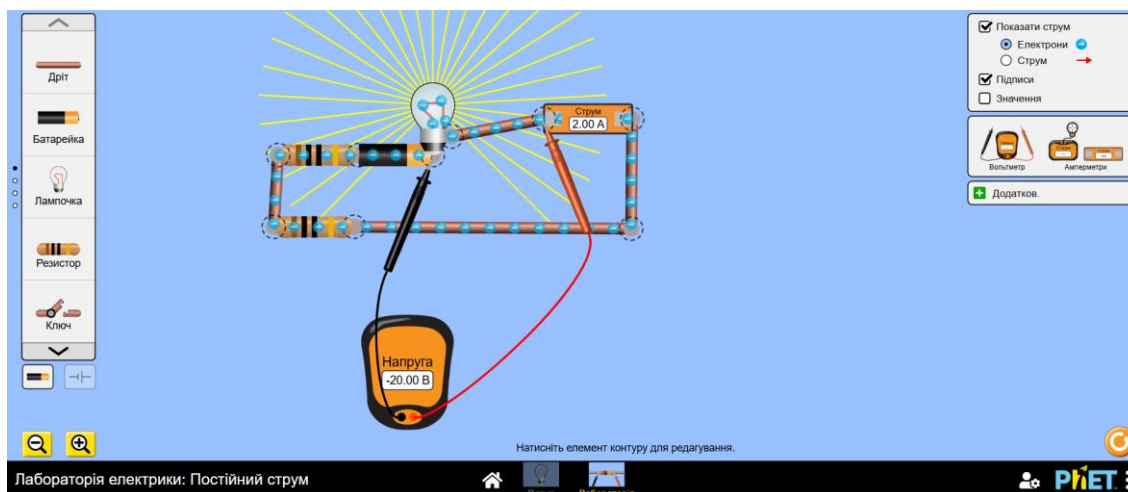


Рисунок 3.3 - Приклад моделювання електричного кола

3. Виходячи із наданих параметрів за допомогою формул п. 1 та виразів для закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad I = \frac{E}{R + r};$$

створити за допомогою симуляції електричне коло за зразком

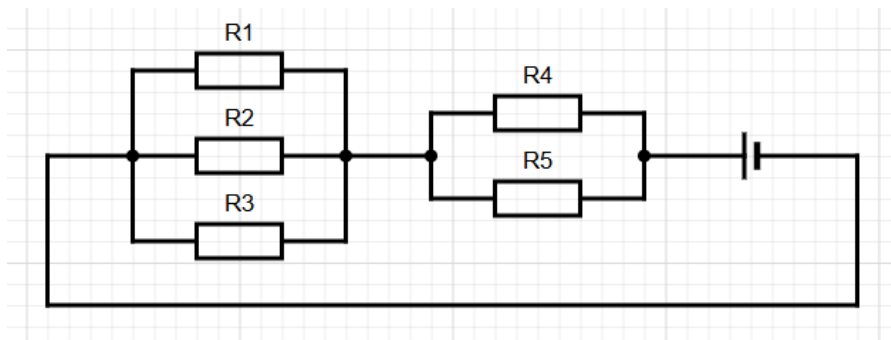


Рисунок 3.4 - Схема електричного кола змодельованого для роботи


зробити необхідні розрахунки та заповнити таблицю:

Таблиця 3.1.

№	E, В	R, Ом	I, А	U, В
1	36	10		
2		20		
3		30		
4		40		
5		50		

4. Перевірити за допомогою симуляції результати розрахунків та підтвердити це за допомогою скриншотів екрану (один скриншотів на один дослід), зробіть висновок.

5. Підготувати звіт та надати його для перевірки.



Лабораторна робота №4 Ознайомлення та вивчення процесів магнітних явищ

Мета: Лабораторна робота спрямована на ознайомлення студентів із магнітними явищами. Основна мета роботи полягає у вивченні залежностей взаємодії магнітних полів постійних магнітів та провідних контурів. Студенти мають навчитися вимірювати та аналізувати параметри, а також використовувати отримані дані для перевірки теоретичних положень з даної теми. Ця робота формує навички експериментального дослідження величин, розвиває вміння обробляти результати вимірювань, оцінювати похибки і формулювати висновки.

Обладнання:

Лабораторна робота виконується у віртуальному середовищі за допомогою симуляції «Лабораторія електромагнетизму» на платформі [PhET Interactive Simulations](#). Для успішного виконання роботи необхідні наступні ресурси та обладнання:

1. Персональний комп'ютер або ноутбук
 - Операційна система: Windows, macOS, Linux.
 - Веббраузер: сучасна версія Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge або Safari.
2. Доступ до інтернету
 - Для завантаження та використання симуляції.
3. Симуляція «Лабораторія електромагнетизму»
 - Інтерактивне середовище з можливістю моделювання різних параметрів (напруга, частота, кількість витків, відстань тощо).
4. Текстовий редактор
 - Для підготовки звіту (Microsoft Word, Google Docs або аналогічний).
5. Калькулятор
 - Для проведення розрахунків під час обробки отриманих даних.

6. Методичні рекомендації

- Інструкція для виконання роботи із зазначенням мети, порядку дій, та формул для розрахунків.

7. Візуалізаційні інструменти

- Можливість будувати графіки залежностей за допомогою графічних програм або вбудованих засобів симуляції.

Цей набір ресурсів забезпечує зручне проведення експериментів, точний аналіз результатів і якісне виконання лабораторної роботи.

Хід роботи:

1. Ознайомитись з наведеним теоретичним матеріалом за темою

У 1820 р. данський вчений Ерстед підніс магнітну стрілку до прямого проводу зі струмом. Ерстед помітив, що стрілка відхиляється і намагається розміститися так, щоб її вісь була перпендикулярною до провідника.

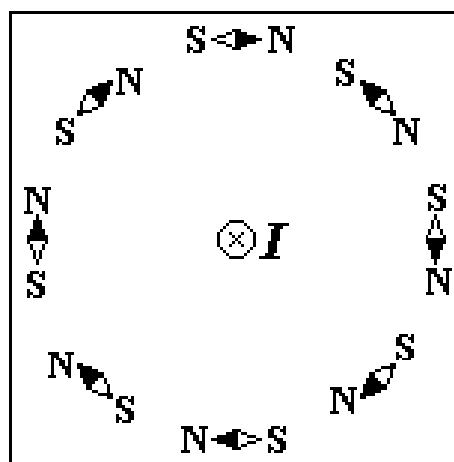


Рисунок 4.1 - Магнітне поле прямолінійного провідника

На рис. 4.1 показано, як орієнтуються магнітні стрілки в площині, перпендикулярній до осі провідника зі струмом I . Хрестик у перерізі провідника вказує на те, що струм тече від спостерігача. N і S – північні та південні полюси магнітних стрілок. Із зміною напрямку струму змінюється і напрям відхилення магнітної стрілки. Якщо електричний струм пропускати



через електролітичну ванну або газорозрядну трубку, то магнітна стрілка також відхилитиметься. Електронний пучок також спричиняє відхилення магнітної стрілки. Того ж таки 1820 р. французький фізик Ампер виявив взаємодію електричних струмів.

З цих фактів було зроблено висновок, що провідник зі струмом створює в оточуючому просторі фізичне поле, яке одержало назву магнітного.

Силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції \vec{B} , який можна визначити за допомогою пробної прямокутної рамки зі струмом I_1 . Проведемо через центр рамки додатну нормаль \vec{n} до площини контура рамки. Додатний напрям нормалі збігається з поступальним рухом свердлика, якщо його рукоятку обертати в напрямі струму I_1 у рамці. Нехай на ділянці KL струм I_1 збігається за напрямом із струмом I .

Магнітні поля обох струмів I й I_1 взаємодіють, і, якщо дати можливість рамці повертатися відносно вертикальної осі, то вона встановиться так, що прямолінійний провідник із струмом I міститиметься в площині рамки.

Магнітним моментом \vec{p}_m замкнутого струму називається векторна фізична величина в напрямі додатної нормалі, яка вимірюється добутком величини струму I_1 в контурі на площу S , що її охоплює цей контур, тобто

$$\vec{p}_m = \vec{n} I_1 S$$

На рамку зі струмом діє механічний обертальний момент \vec{M} пари сил. Вектор \vec{M} має напрям вертикальної осі рамки і матиме максимальне значення M_1 , якщо радіус-вектор \vec{r} перпендикулярний до площини контура рамки. Дослід показує, що при $r = \text{const}$, тобто на однакових віддальях від прямолінійного провідника зі струмом I , відношення M_1/p_m залишається незмінним.



Магнітна індукція визначається відношенням максимальної величини обертального механічного момента рамки із струмом до її магнітного момента:

$$B = M_1/p_m$$

Магнітна індукція є величина векторна. Вектор \vec{B} має напрям додатної нормалі \vec{n} (і \vec{p}_m), якщо рамка перебуває в стані рівноваги, тобто коли $M = 0$

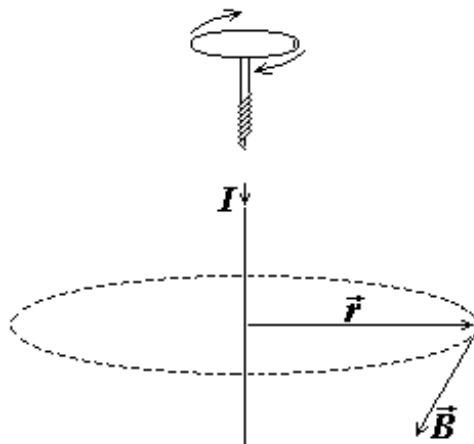



Рисунок 4.2 - Правило свердлика

Лініями магнітної індукції називають криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора \vec{B} в цих точках поля. Лінії магнітної індукції завжди замкнені й охоплюють провідник зі струмом. Для визначення напрямку ліній магнітної індукції можна скористатися правилом свердлика: якщо свердлик повертати так, щоб його поступальний рух збігався з напрямом струму I , то обертальний рух рукоятки покаже напрям ліній магнітної індукції.

Зручне також і правило охоплення правою рукою: якщо великий палець правої руки спрямувати в напрямі струму, а рештою пальців охопити провідник із струмом, то вони вкажуть напрям ліній магнітної індукції (і вектора \vec{B}).



Одиниця вимірювання магнітної індукції $[B] = \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{А}\cdot\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{А}\cdot\text{м}} = \text{Тл}$ (тесла).

Ампер експериментально встановив, що два прямих постійних струми взаємодіють між собою: паралельні струми притягуються, антипаралельні відштовхуються. Два нескінченно довгі паралельні провідники (практично такими можна вважати паралельні провідники, довжина l яких набагато перевищує відстань r між ними) взаємодіють з силою F , прямо пропорційною струмам I_1 і I_2 , в них, довжині l ділянок провідників і обернено пропорційною відстані r між ними:

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$$

де μ – магнітна проникність середовища, безрозмірна величина, яка показує, у скільки разів сила магнітної взаємодії провідників у цьому середовищі більша, ніж у вакуумі; μ_0 – магнітна стала.

Вивчення взаємодії двох прямих постійних паралельних струмів дало змогу встановити одиницю величини струму в системі СІ. Ампер (А) – це сила незмінного струму, який, проходячи по двох нескінченно довгих паралельних прямолінійних провідниках дуже малого кругового перерізу, розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, спричиняє їх взаємодію із силою $2 \cdot 10^{-7}$ ньютонів на кожний метр довжини.

З означення ампера і формули сили взаємодії паралельних провідників знайдемо значення магнітної сталої $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Одиницю сили струму ампер відтворюють за допомогою так званих струмових терезів, або ампер-терезів, виготовлених з немагнітних матеріалів. Вони являють собою рівноплечні терези. Рухома котушка, підвішена до однієї з шальок терезів, зрівноважується вантажем, покладеним на другу шальку терезів, і входить у другу нерухому коаксіально розміщену котушку. При проходженні по цих котушках



постійного електричного струму рухома котушка опускається в результаті магнітної взаємодії струмів котушок. Для компенсації сили взаємодії струмів слід покласти на шальку терезів з вантажем додатковий вантаж. Сила взаємодії котушок $F = kI_1I_2 = kI^2$, де I_1 і I_2 – сили струмів у котушках (при послідовному з'єднанні $I_1 = I_2 = I$); k – сталий коефіцієнт, який залежить від форми, розмірів і взаємного розташування котушок, від діаметра перерізів проводів котушок, від магнітної проникності середовища і враховує особливості взаємодії котушок у порівнянні зі взаємодією прямолінійних провідників. З іншого боку, згідно з другим законом Ньютона $F = mg$, де F - сила тяжіння додаткового вантажу, m – маса додаткового вантажу, g – прискорення вільного падання. Терези перебуватимуть у рівновазі, коли $kI^2 = mg$. Звідси $I = \sqrt{mg/k}$. Таким чином, знаючи масу додаткового вантажу, можна визначити силу струму, що проходить по котушках.

У 1820 р. французькі вчені Біо і Савар, вивчаючи магнітні поля провідників різної форми, встановили, що величина вектора індукції \vec{B} завжди пропорційна силі струму I в провіднику. Інших висновків із результатів своїх досліджень вони зробити не змогли. Загальну математичну обробку експериментальних результатів Біо і Савара виконав видатний французький математик і фізик Лаплас. Виведена ним формула для індукції $d\vec{B}$ магнітного поля, створюваного елементом провідника довжиною dl із струмом I в ньому, називається законом Біо-Савара-Лапласа:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

або у векторній формі:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}$$



де r – відстань від елемента провідника до точки A , в якій визначається індукція магнітного поля, вектор \vec{r} вважається напрямленим від елемента провідника до точки A ; $d\vec{l}$ – вектор, модуль якого дорівнює dl , і напрямлений цей вектор уздовж елемента провідника в той же бік, що і струм у провіднику; α – кут між векторами $d\vec{l}$ і \vec{r} .

Щоб визначити індукцію \vec{B} магнітного поля, створюваного в точці A провідником зі струмом I , потрібно поділити його на елементи Δl_i , обчислити елементарну індукцію $\Delta\vec{B}_i$, створювану в точці A кожним елементом, і знайти векторну суму: $\vec{B} = \sum_{i=1}^N \Delta\vec{B}_i$.

У випадку, коли поле створюється прямим струмом, усі елементарні вектори $\Delta\vec{B}_i$ напрямлені вздовж однієї прямої і векторне додавання можна замінити алгебраїчним або інтегральною сумою.

Відповідні розрахунки дозволяють одержати формулу для магнітної індукції \vec{B} , створюваної відрізком прямого провідника із струмом I в точці, що міститься на відстані r_0 від осі провідника:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{r_0} (\cos \phi_1 - \cos \phi_2)$$

Індукція магнітного поля, створюваного нескінченно довгим прямим провідником ($\phi_1 = 0$, $\phi_2 = \pi$) на віддалі r_0 від нього,

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r_0}$$

На практиці цією формулою можна, користуватися, коли визначається індукція у точці, яка міститься на віддалі r_0 від осі прямолінійного відрізка провідника, малій порівняно з відстанню до кінців відрізка провідника. Тоді у формулі $\cos \phi_1 \approx 1$; $\cos \phi_2 \approx -1$.



Індукція \vec{B} магнітного поля в точці O' , яка лежить на осі колового витка на відстані h від його центра,

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\vec{p}_m}{(R^2 + h^2)^{3/2}}$$

де R – радіус колового витка, \vec{p}_m – вектор магнітного моменту витка, модуль якого $p_m = \pi R^2 I$

Зокрема, індукція магнітного поля в центрі колового струму (в точці O) $B = \mu\mu_0 \cdot \frac{I}{2R}$. Якщо $h \gg R$, тобто на осі колового струму на великій відстані від його центра (порівняно з радіусом витка),

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\vec{p}_m}{h^3}$$

Циліндрична котушка довжиною l (соленоїд), яка складається з N витків дроту (колових струмів), у довільній точці M , що лежить на її осі, створює поле з індукцією


$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} \cdot nI(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

де $n = N/l$ – кількість витків на одиницю довжини котушки, θ_1 і θ_2 – кути, під якими з точки M видно кінці котушки ($\theta_2 > \theta_1$).

Поле на осі нескінченно довгого соленоїда визначається формулою

$$B = \mu\mu_0 I n$$

На практиці цією формулою можна користуватися для визначення індукції на осі довгого соленоїда в точках, віддалених від його країв, коли $\cos \theta_2 \approx -1$, $\cos \theta_1 \approx 1$. Поле на осі довгого соленоїда на його кінцях (де $\theta_1 = \pi/2$; $\theta_2 \approx \pi$)


$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} \cdot nI$$

Циркуляцією вектора \vec{B} індукції магнітного поля вздовж замкнутого контура L називається інтеграл такого вигляду:

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \oint_L B \cdot dl \cdot \cos \alpha = \oint_L B_l \cdot dl$$

де α – кут між векторами \vec{B} і $d\vec{l}$, dl – елемент довжини контура, $d\vec{l}$ вектор, модуль якого дорівнює dl і який напрямлений вздовж контура у напрямі його обходу, B_l – проекція вектора \vec{B} на напрям $d\vec{l}$. Визначимо циркуляцію вектора \vec{B} вздовж якоїсь лінії індукції магнітного поля прямого струму. У цьому випадку $\cos \alpha = 1$.

А, отже, індукція магнітного поля

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{R}$$

Тоді циркуляція

$$\oint_L (\vec{B} \cdot d\vec{l}) = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{2R} \int_0^{2\pi R} dl = \mu\mu_0 I$$

Одержаний результат справджується для провідників будь-якої конфігурації, аби тільки контур, по якому розраховується циркуляція, охоплював струм.

2. Перейти за посиланням

https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-electromagnetic-lab/latest/faradays-electromagnetic-lab_all.html.

Запустити симуляцію та опрацювати можливі функції. Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання.

3. Опрацюйте першу симуляцію: змінюючи положення магніту та компасу розгляньте закономірності зміни характеристик поля за допомогою вимірювального приладу.

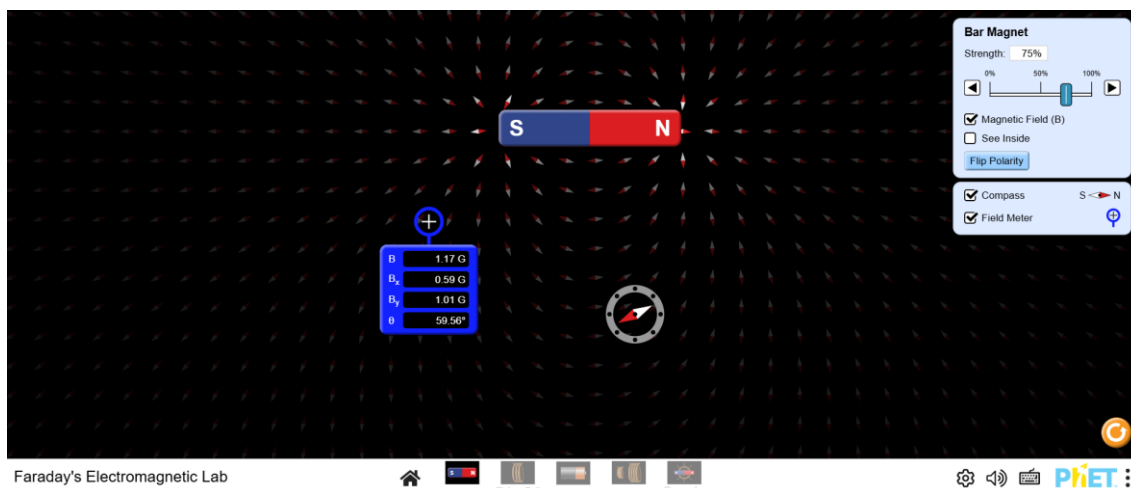


Рисунок 4.3 - Симуляція магнітного поля штабового магніта

Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання та запишіть висновки.

4. Опрацюйте другу симуляцію: змінюючи положення магніту та швидкість його руху розгляньте закономірності зміни напруги за допомогою вимірювального приладу.

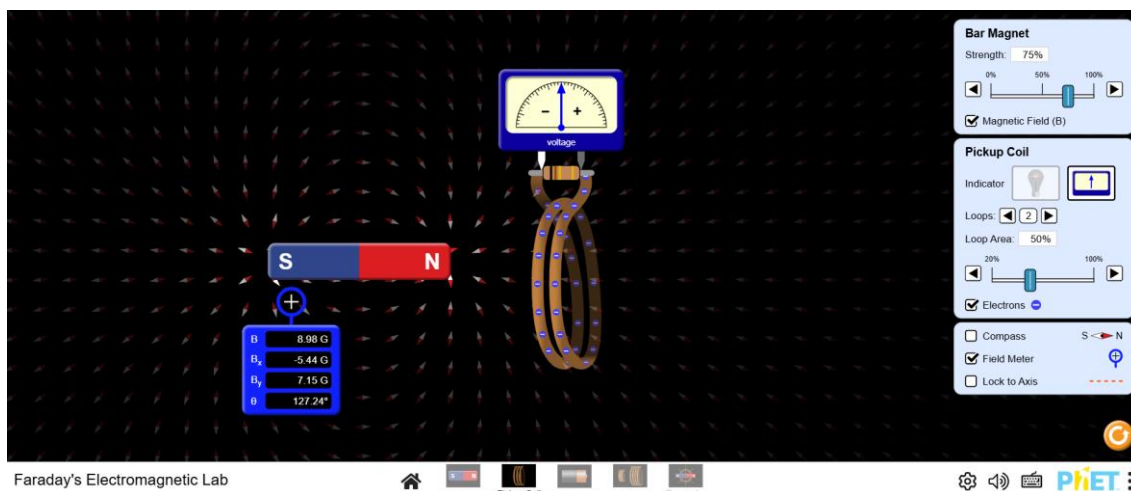


Рисунок 4.4 - Симуляція закону електромагнітної індукції



Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання та запишіть висновки.

5. Опрацюйте третю симуляцію: змінюючи положення котушки та напругу розгляньте закономірності зміни характеристик поля за допомогою вимірювального приладу.

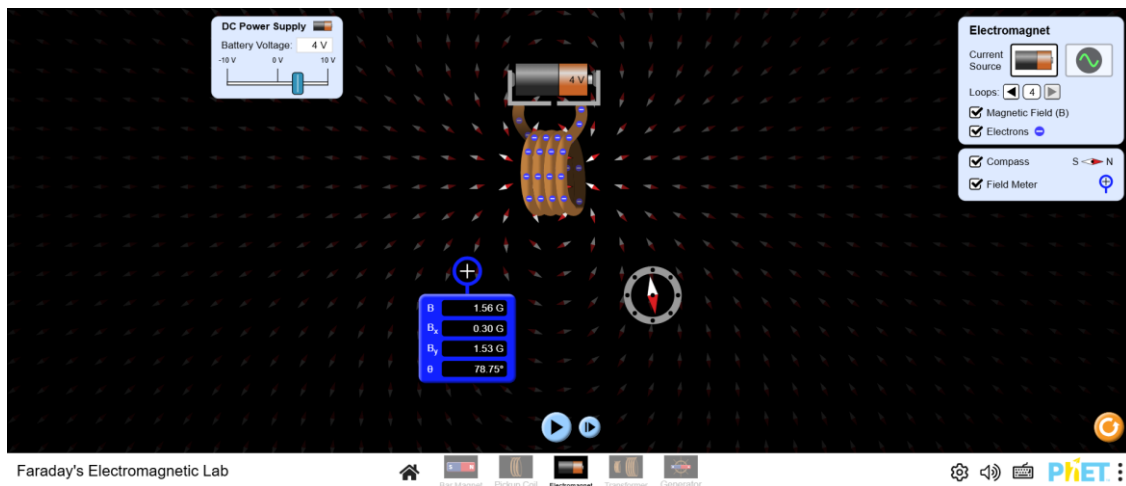


Рисунок 4.5 - Симуляція магнітного поля котушки

Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання та запишіть висновки.

6. Опрацюйте четверту симуляцію: змінюючи характеристики та положення котушок закономірності, що лягли в основу роботи трансформатора.

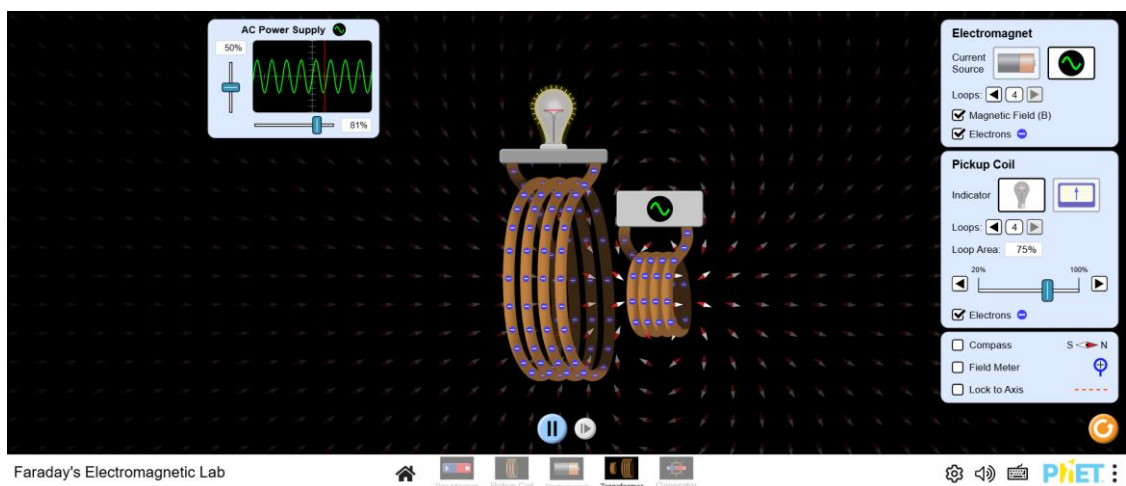


Рисунок 4.6 - Симуляція принципу роботи трансформатора

Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання та запишіть висновки.

7. Опрацюйте п'яту симуляцію: змінюючи потік рідини, кількість витків силу магніту та площу контуру розгляньте закономірності зміни генерації ЕРС.

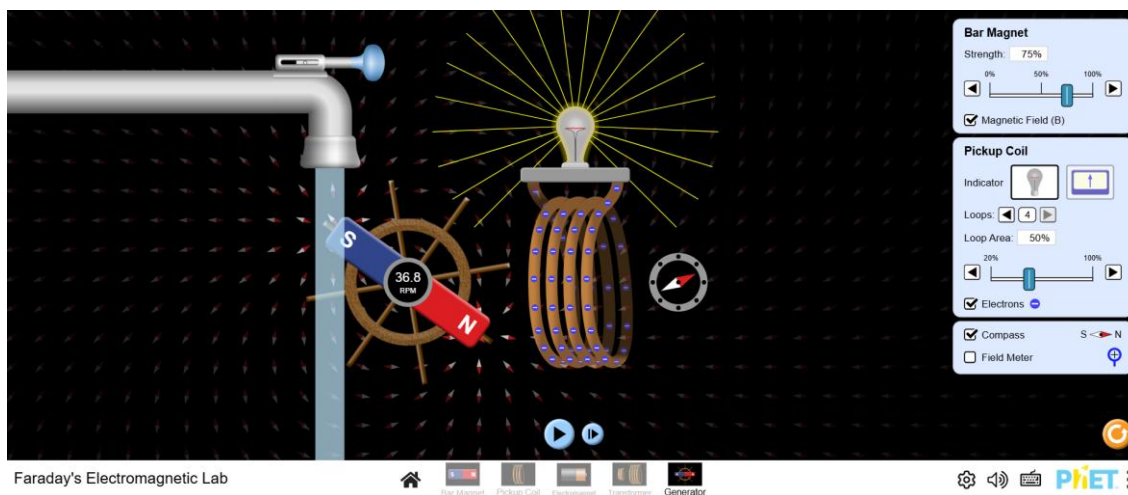



Рисунок 4.7 - Симуляція роботи генератора

Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання та запишіть висновки.

8. Підготувати звіт та надати його для перевірки.



Лабораторна робота №5 Побудова електричних кіл змінного струму

Мета: Лабораторна робота спрямована на ознайомлення студентів із законами протікання змінного електричного струму в електричних колах. Основна мета роботи полягає у вивченні математичних залежностей між опором, напругою, силою струму та частотою. Студенти мають навчитися вимірювати та аналізувати параметри, а також використовувати отримані дані для перевірки теоретичних положень з даної теми. Ця робота формує навички експериментального дослідження величин, розвиває вміння обробляти результати вимірювань, оцінювати похибки і формулювати висновки.

Обладнання:

Лабораторна робота виконується у віртуальному середовищі за допомогою симуляції «Лабораторія електрики: змінний струм» на платформі [PhET Interactive Simulations](#). Для успішного виконання роботи необхідні наступні ресурси та обладнання:

1. Персональний комп'ютер або ноутбук
 - Операційна система: Windows, macOS, Linux.
 - Веббраузер: сучасна версія Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge або Safari.
2. Доступ до інтернету
 - Для завантаження та використання симуляції.
3. Симуляція «Лабораторія електрики: змінний струм»
 - Інтерактивне середовище з можливістю моделювання різних параметрів (опір, напруга, сила струму, тип з'єднання тощо).
4. Текстовий редактор
 - Для підготовки звіту (Microsoft Word, Google Docs або аналогічний).
5. Калькулятор



- Для проведення розрахунків під час обробки отриманих даних.
6. Методичні рекомендації
- Інструкція для виконання роботи із зазначенням мети, порядку дій, та формул для розрахунків.
7. Візуалізаційні інструменти
- Можливість будувати графіки залежностей за допомогою графічних програм або вбудованих засобів симуляції.

Цей набір ресурсів забезпечує зручне проведення експериментів, точний аналіз результатів і якісне виконання лабораторної роботи.

Хід роботи:

1. Ознайомитись з наведеним теоретичним матеріалом за темою
Змінним електричним струмом називається такий струм, величина і напруга якого періодично змінюються за певним законом. Чи вивчатимемо технічний, або синусоїдний, змінний струм, сила струму і напруга якого змінюються за законом синуса. Такий струм можна отримати, якщо виток проводу рівномірно обертати в однорідному магнітному полі відносно осі, перпендикулярної до напрямку ліній магнітної індукції.

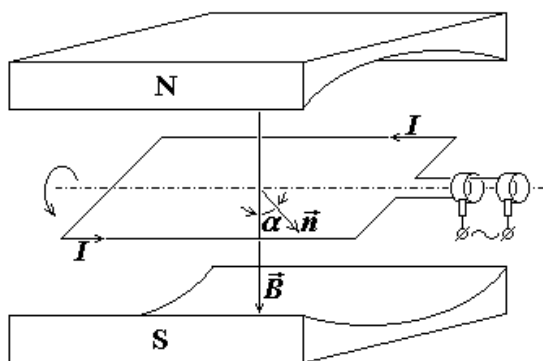


Рисунок 5.1 - Принцип роботи генератора змінної ЕРС

Якщо рамка обертається рівномірно, то кут α , який створює нормаль \vec{n} до площини рамки з вектором магнітної індукції \vec{B} , зростає з часом лінійно: $\alpha = \omega t$, де ω – кутова швидкість обертання рамки. Магнітний потік



через рамку $\Phi = BS \cos \omega t$. ЕРС індукції в рамці $E = -d\Phi/dt = BS \sin \omega t$. Кінці витка (рамки) підведені до двох ізолюваних мідних кілець (контактних кілець), укріплених на осі машини. За допомогою притискних провідників з міді або графіту (щіток) рамку можна ввімкнути в замкнуте коло струму, не порушуючи її обертання.

Якщо обмотка має не один, а N витків проводу, то ЕРС індукції

$$E = NBS\omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

де E_m – амплітуда ЕРС. У Європі користуються змінним струмом з частотою $\nu = 50$ Гц. Відповідна циклічна частота становить $\omega = 2\pi\nu = 100\pi$ рад/с. Тому за рахунок підвищення циклічної частоти ω амплітуду ЕРС збільшити не можна. Але можна у μ разів збільшити магнітну індукцію B . Для цього обмотки розміщують у пазах обертового осердя з м'якого заліза – ротора.

Електрони в електричному колі змінного струму виконують коливальний рух. В колі постійного струму електрони рухаються весь час в одному напрямі.

Найпростіший генератор постійного за напрямом, або ж прямого, струму конструктивно подібний до розглянутого елементарного генератора змінного струму. Але тут кінці обмотки приєднані не до двох кілець, а до двох мідних ізолюваних півциліндрів, насаджених на вісь машини. Ці півциліндри є пластинами колектора – пристрою для перетворення змінної ЕРС, що виникає в обмотці, на ЕРС незмінного напрямку. До пластин колектора притискаються дві щітки, які вмикають обмотку в коло струму. Зверніть увагу на те, що конструкція генератора постійного струму повністю повторює конструкцію електродвигуна постійного струму. Це означає, що одна й та сама машина може



працювати і як генератор, і як двигун.

Період технічного змінного струму $T = 1/\nu = 0,02$ с. Для такого струму довжина електромагнітної хвилі $\lambda = cT = 3 \cdot 10^8$ м/с $\cdot 0,02$ с = 6000 км (с – швидкість світла у вакуумі). Це дуже велика довжина порівняна з довжиною ліній електропередачі. Остання не перевищує кількох сотень кілометрів. Тому величина струму в певний момент часу практично однакова в усіх точках кола, і технічний змінний струм називають квазістаціонарним. До квазістаціонарних струмів можна застосувати закон Ома та правила Кірхгофа.

В електротехніці миттєві значення сили струму, напруги, ЕРС та потужності позначаються відповідними малими буквами: i , u , e , r . Тому виведену раніше формулу ЕРС генератора змінного струму слід записувати так: $e = E_m \sin \omega t$.

Зануримо в калориметр з водою спіраль і деякий час пропускатимемо по ній змінний струм. Повторимо цей дослід з постійним струмом, причому підберемо його так, щоб у калориметрі за той самий час виділилась така сама кількість тепла. Ми звели дію змінного струму за енергетичним ефектом до дії постійного струму. Діюче, або ефективне, значення величини змінного струму I (діючі значення позначаються відповідними великими буквами) дорівнює величині такого постійного струму, який за той самий проміжок часу виділяє в деякому опорі таку саму кількість тепла, як і даний змінний струм.

Визначимо ефективні значення сили струму I і напруги U . Елементарна робота змінного струму за час dt буде: $dA = i^2 R dt = I_m^2 R \sin^2 \omega t \cdot dt$. Середня потужність змінного струму за один період

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 R \sin^2(\omega t) dt = \frac{I_m^2 R}{\omega T} \int_0^T \frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)] d(\omega t) = \\ &= \frac{I_m^2 R}{2\omega T} \left[\int_0^T d(\omega t) - \frac{1}{2} \int_0^T \cos(2\omega t) \cdot d(2\omega t) \right] \end{aligned}$$



Другий інтеграл дорівнює нулю, отже $\bar{p} = I_m^2 R/2$. Потужність ефективного струму

$$p = I^2 R$$

За визначенням $I^2 R = I_m^2 R/2$, звідки ефективне значення сили струму

$$I = I_m/\sqrt{2} = 0,707I_m$$

Так само ефективне значення напруги

$$U = U_m/\sqrt{2} = 0,707U_m$$

Амперметр і вольтметр у колі змінного струму показують не миттєві (i , u) й не максимальні (I_m , U_m) значення струму і напруги, а ефективні (I , U). Якщо вольтметр у колі змінного струму показує 220 В, то $U = 220 \text{ В} = 0,707 U_m$, звідки $U_m = 220 \text{ В}/0,707 = 311 \text{ В}$. Отже, напруга змінного струму набуває миттєвих значень в межах від +311 В до 0 і від 0 до -311 В.

У колі змінного струму внаслідок дії ємності й індуктивності може виникнути різниця фаз φ (зсув фаз) між напругою і струмом – напруга і величина струму неодноразомно досягають нульових і амплітудних значень. Напруга може випередити струм і навпаки. Нехай, наприклад, напруга випереджає струм за фазою на $\varphi = \pi/4 = 45^\circ$ (або в часі на $T/8$). Тоді $i = I_m \sin \omega t$; $u = U_m \sin(\omega t + \pi/4)$. Графіки цих рівнянь зображені по осі абсцис відкладений час t , або відповідна фаза ωt . Синусоїди u та i зміщені між собою на 45° або на $T/8$.

Змінні струми і напруги можна зобразити також векторами на комплексній площині. Умовне векторне зображення синусоїдних функцій дозволяє наочно показати кількісні і фазові співвідношення в колах змінного струму. Довжина вектора дорівнює у відповідному масштабі



діючому (ефективному) значенню величини струму або напруги. Вектор виходить з початку координат і відхиляється від додаткової півосі абсцис у напрямі протилежному рухові стрілки годинника на кут, що дорівнює фазі відповідної величини в початковий момент часу. Тому в нашому прикладі вектор величини струму I напрямлений вздовж осі абсцис ($\phi_I = 0$), а вектор напруги U , повернутий на кут $\varphi = 45^\circ$.

Вектор на комплексній площині може бути записаний як комплексне число у тригонометричній формі:

$$\dot{U} = U(\cos \phi + j \sin \phi)$$

де U – модуль комплексного числа, φ – його аргумент, а $j = \sqrt{-1}$. Можна записати комплексне число ще й в алгебраїчній формі:

$$\dot{U} = U_x + jU_y$$

де $U_x = U \cos \phi$ і $U_y = U \sin \phi$ – дійсна і уявна частини комплексного числа. З математики відомо, що $e^{j\phi} = \cos \phi + j \sin \phi$. Тому комплексне число можна подати в показниковій формі:


$$\dot{U} = Ue^{j\phi}$$

Від алгебраїчної форми комплексного числа до показникової чи тригонометричної переходимо за допомогою формул:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}, \quad \phi = \operatorname{arctg} \frac{U_y}{U_x}$$

Коли треба додавати кілька коливань, їх зручніше записати в алгебраїчній формі. Так, при додаванні напруг

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) \text{ і } u_2 = U_{2m} \sin(\omega t + \phi_2)$$



маємо: $\dot{U}_1 = U_1 \cos \phi_1 + jU_1 \sin \phi_1$; $\dot{U}_2 = U_2 \cos \phi_2 + jU_2 \sin \phi_2$;

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = (U_1 \cos \phi_1 + U_2 \cos \phi_2) + j(U_1 \sin \phi_1 + U_2 \sin \phi_2) = U_x + jU_y.$$

Далі знаходимо ефективне значення U та фазу ϕ напруги з наведених формул.

Щоб перемножити ці ж напруги u_1 і u_2 їх зручніше записати в показниковій формі: $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\phi_1}$; $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\phi_2}$. Тоді

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \dot{U}_2 = U_1 U_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)} = U e^{j\phi}$$

Звідси $U = U_1 U_2$; $\phi = \phi_1 + \phi_2$

Розглянемо спочатку окремих випадок, коли генератор змінного струму замкнений на зовнішнє коло, яке має такі малі індуктивність і ємність, що ними можна знехтувати. Припустимо, що в колі тече змінний струм $i = I_m \sin \omega t$. Застосовуючи закон Ома, маємо:

$$u = iR = I_m R \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

Отже, напруга на кінцях ділянки змінюється також за законом синуса; причому різниця фаз між коливаннями струму і напруги дорівнює нулю. Напруга і струм одночасно досягають максимальних значень і одночасно проходять через нуль. Отже, вектори I та U напрямлені вздовж однієї прямої. Зв'язок між комплексними числами, що відповідають цим векторам, має вигляд: $\dot{U} = \dot{I}R$.

Припустимо тепер, що ділянка кола містить конденсатор ємності C , причому опором і індуктивністю ділянки можна знехтувати. Позначимо різницю потенціалів точок a і b через $u = \phi_a - \phi_b$ і вважатимемо заряд конденсатора q і величину струму i додатними, якщо вони мають таку полярність зарядів і такий напрям струму, як на рисунку. Тоді $u = q/C$. Але $i = dq/dt$, а отже, $q = \int i dt$. Якщо величина струму в колі змінюється за законом $i = I_m \sin \omega t$, то $q = \int I_m \sin \omega t dt = -\frac{I_m}{\omega} \cos \omega t + q_{\text{const}}$. Стала



інтегрування q_{const} у цій формулі означає довільний сталий заряд конденсатора, не пов'язаний з коливаннями струму. Тому припустимо, що $q_{\text{const}} = 0$. Тоді

$$u = -\frac{I_m}{\omega C} \cdot \cos \omega t = \frac{I_m}{\omega C} \cdot \sin(\omega t - \pi/2)$$

Таким чином, при синусоїдних коливаннях струму в колі напруга на конденсаторі змінюється також за законом синуса, але коливання напруги на конденсаторі відстають за фазою від коливань струму на $\pi/2$. Цей результат має просте фізичне пояснення. Напруга на конденсаторі в будь-який момент часу визначається зарядом конденсатора. Але цей заряд був утворений струмом, що проходив на більш ранній стадії коливань. Тому і коливання напруги запізнюються відносно коливань струму. Амплітуда напруги на конденсатор

$$U_m = \frac{I_m}{\omega C}$$

Порівнюючи цей вираз з законом Ома для ділянки кола з постійним струмом ($U = IR$), ми бачимо, що величина

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

відіграє роль опору. Тому вона дістала назву позірної опору ємності. Знайдені результати можна подати у вигляді векторної діаграми. Тут вектор, який зображає коливання напруги, вже не збігається з віссю струмів. Він повернутий у від'ємному напрямі (за стрілкою годинника) на кут $\pi/2$. Довжина цього вектора дорівнює амплітуді напруги. У показниковій формі комплексні числа, що відповідають векторам, мають вигляд:

$$\dot{I} = I e^{j0}; \quad \dot{U} = U e^{-j\pi/2}.$$



Запровадивши комплексний опір конденсатора

$$\underline{Z} = \frac{1}{\omega C} \cdot e^{-j\pi/2}$$

запишемо зв'язок між комплексами напруги \underline{U} і струму \underline{I} у вигляді:

$$\underline{U} = j\underline{Z}$$

Якщо скласти коло, що містить конденсатор змінної ємності і лампочку розжарювання (як демонстраційний амперметра), і ввімкнути його в освітлювальну мережу змінного струму, то, змінюючи величину ємності, можна впевнитися, що чим більша ємність конденсатора, тим сильніший струм у колі (яскравіше світить лампочка), а отже, тим менший позірний опір ємності.

Розглянемо, нарешті, третій окремий випадок, коли ділянка кола містить лише індуктивність. Позначимо, як і раніше, через $U = \phi_a - \phi_b$ різницю потенціалів точок а і б і вважатимемо струм і додатним, якщо він має напрям від а до б. Змінний струм спричинить появу в котушці індуктивності ЕРС самоіндукції, тому ми повинні застосовувати закон Ома для ділянки кола з ЕРС: $U = IR - E$. У нашому випадку $R = 0$, а ЕРС самоіндукції $e = -L \frac{di}{dt}$. Тому $u = L \frac{di}{dt}$. Якщо величина струму в колі змінюється за законом $i = I_m \sin \omega t$, то

$$u = I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin(\omega t + \pi/2)$$

Ми бачимо, що коливання напруги на індуктивності випереджають за фазою коливання струму на $\pi/2$. Фізична причина виникнення цієї різниці фаз така. Якщо опір ділянки дорівнює нулю, то прикладена напруга точно зрівноважує ЕРС самоіндукції і тому дорівнює ЕРС самоіндукції з протилежним знаком. Але ця остання пропорційна не миттєвому



значенню струму, а швидкості його зміни, яка буде найбільшою тоді, коли величина струму проходить через нуль. Тому максимумами напруги збігаються з нулями струму і навпаки. Амплітуда напруги дорівнює $U_m = I_m \omega L$, а отже, величина $X_L = \omega L$ відіграє таку саму роль, що й опір. Тому X_L називають позірним опором індуктивності. На векторній діаграмі вектор напруги повернутий відносно вектора сили струму в додатному напрямі (проти руху стрілки годинника) на кут $\pi/2$, а його довжина дорівнює амплітуді напруги $U_m = I_m \omega L$. У показниковій формі комплексні числа, що відповідають векторам, мають вигляд: $\dot{I} = I e^{j0}$; $\dot{U} = U e^{j\pi/2}$.

Для кола з індуктивністю теж буде справедливим закон Ома у комплексній формі, якщо запровадити комплексний опір індуктивності

$$\underline{Z} = \omega L e^{j\pi/2}$$

Позірний опір індуктивності використовують для виготовлення дроселів. Це дротяні котушки (з залізом чи без нього), які вводять у кола змінного струму для регулювання величини струму. Порівняно з реостатом дроселі мають ту важливу перевагу, що збільшення опору кола за їх допомогою не супроводжується збільшенням виділення тепла Ленца-Джоуля, а отже, марними втратами енергії. Увімкнемо в коло змінного струму послідовно лампочку розжарювання і котушку індуктивності. Активний опір складається з опору лампочки й опору дроту котушки. Будемо тепер вставляти всередину котушки залізні дротини або суцільний стержень. Дослід показує, що світіння лампочки послаблюється зі збільшенням індуктивності котушки.

Користуючись одержаними результатами, можна знайти співвідношення між коливаннями струму і напруги в будь-якому колі.

Розглянемо спочатку послідовне сполучення опору, ємності і індуктивності. Припустимо, як і раніше, що струм у колі змінюється за законом $i = I_m \sin \omega t$, і обчислимо напругу між кінцями кола. Оскільки при



послідовному сполученні провідників напруги додаються, то й шукана напруга U є сумою трьох напруг: на опорі, на ємності і на індуктивності. Знайдемо суму комплексних напруг:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}R + \dot{I}\omega L e^{j\pi/2} + \dot{I} \frac{1}{\omega C} e^{-j\pi/2} = \\ &= \dot{I} \left(R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C} \right) = \dot{I} \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] = \dot{I} \underline{Z}\end{aligned}$$

І ми знову одержали закон Ома в комплексній формі.

Величина \underline{Z} називається повним комплексним опором ділянки кола або імпедансом. Дійсна частина R імпедансу називається активним опором, або резистансом. Уявну частину

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

називають реактивним опором, або реактансом. Модуль імпедансу

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

аргумент імпедансу

$$\phi = \arctg \frac{X}{R}$$

Тоді діюче значення напруги

$$U = IZ$$

Коливання напруги випереджають за фазою коливання сили струму на величину ϕ (якщо $X_C > X_L$, то $\phi < 0$ і коливання напруги відстають). Напругу U , можна знайти й графічно за допомогою векторної діаграми. На рис. показано також трикутник опорів, який можна отримати, поділивши сторони трикутника напруг на комплекс струму \dot{I} .



Припустимо, що в розглядуваному колі діє змінна ЕРС

$$e = E_m \sin \omega t$$

Тоді в колі тектиме змінний струм

$$i = I_m \sin(\omega t - \phi),$$

амплітуда якого

$$I_m = E_m / Z$$

а фазовий кут, на який коливання сили струму відстають від коливань напруги,

$$\phi = \arctg \frac{X}{R}$$

Розглянемо випадок, коли індуктивний опір X_L дорівнює ємнісному опоріві X_C . Тоді $\omega L = \frac{1}{\omega C}$; $I \cdot \omega L = I \cdot \frac{1}{\omega C}$; $U_L = U_C$. Спад напруги на кінцях котушки індуктивності дорівнює спаду напруги на обкладках конденсатора. Таке явище називається резонансом напруг. Резонанс напруг можна здійснити, змінюючи L (або C) при $\omega = \text{const}$ або змінюючи ω , якщо L і C сталі. Циклічна частота, на якій настає резонанс, називається резонансною частотою ω_p . З формули $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ дістаємо:

$$\omega_p = 1/\sqrt{LC}$$

звідки період змінного струму

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Формула добре відома в радіотехніці під назвою формули Томпсона. Повний опір кола Z і амплітуда величини струму I в ньому залежать



від частоти ω . Ця залежність графічно зображена на рис. Характерні особливості резонансу напруг такі: а) повний опір кола при резонансі мінімальний і дорівнює активному опорі: $Z_p = Z_{\min} = R$; б) сила струму має найбільше значення: $I_p = I_{\max} = U/R$; в) напруга на активному опорі дорівнює прикладеній напрузі: $U_R = I_p R = U$; г) напруга і струм перебувають в однакових фазах $\phi = \arctg 0 = 0$.

Напруга на конденсаторі при резонансі напруг $U_{Cp} = X_{Cp} I_p = \frac{X_{Cp}}{R} \cdot U = QU$. Величина Q , яка показує, у скільки разів індуктивний X_L або ємнісний X_C опір при резонансі ($X_{Lp} = X_{Cp}$) перевищує активний опір R контура, називається добротністю контура. Напруга на конденсаторі або на котушці індуктивності при резонансі напруг у Q раз перевищує напругу U , прикладену до всього ланцюжка. Отже, добротність контура

$$Q = \frac{X_{Cp}}{R} = \frac{X_{Lp}}{R} = \frac{U_{Cp}}{U} = \frac{U_{Lp}}{U}$$

Вище ми розглядали коло, в якому активні і реактивні опори були сполучені послідовно. Розглянемо тепер показане коло, що складається з паралельно сполучених ланцюжків. Нехай коло розгалужується на два ланцюжки, один з яких має конденсатор ємністю C , а другий - котушку індуктивності L . В ланцюжку з індуктивністю слід також врахувати активного опорі R дроту котушки. До точок кола а і б прикладена змінна напруга $u = U_m \sin \omega t$, або в комплексній формі $\dot{U} = U e^{j0}$. Імпеданс ланцюжка з котушкою індуктивності $\underline{Z}_k = Z_k e^{j\phi_k}$, де $Z_k = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, $\phi_k = \arctg \frac{\omega L}{R}$ Імпеданс ділянки з конденсатором $\underline{Z}_c = \frac{1}{\omega C} e^{-j\pi/2}$. Величина струму у ланцюжках:

$$\dot{I}_L = \dot{U} / \underline{Z}_k = \frac{U}{Z_k} e^{-j\phi_k}, \quad \dot{I}_C = \dot{U} / \underline{Z}_c = U \omega C e^{j\pi/2}.$$

У випадку нерозгалуженого кола для всіх елементів кола (L , C , R)



однаковою була величина струму, і задача зводилась до додавання коливань напруги на індуктивності, ємності і опорі. Для цього ми користувалися векторними діаграмами напруги. У випадку розгалуженого кола, навпаки, однаковою є напруга між точками а і б, а струми в ланцюжках різні. Комплекс струму в нерозгалуженій ділянці кола $\dot{I} = \dot{I}_L + \dot{I}_C$. Тому задача зводиться до додавання коливань струму, тобто ми повинні побудувати векторну діаграму струмів. З цієї векторної діаграми можна визначити величину струму I і кут φ , утворений вектором струму \dot{I} з вектором напруги \dot{U} . Це той самий кут, на який коливання струму і випереджають за фазою коливання напруги u . Отже, коливання струму в нерозгалуженій ділянці кола визначаються формулою: $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Якщо в розгалуженому колі змінювати індуктивність L , ємність C або частоту генератора ω , то змінюються і величина струму I і зсув фаз φ між струмом і напругою. При деяких співвідношеннях між L , C і ω зсув фаз φ дорівнює нулю і, отже, опір контура стає чисто активним. Цей окремий випадок вимушених коливань у розгалуженому колі називається резонансом струмів.

Коли ж $\omega_p L \gg R$ струм у нерозгалуженій ділянці кола

$$I = \frac{UR}{\omega_p^2 L^2}.$$

Опір контура при резонансі

$$R_p = \frac{U}{I} = \frac{\omega_p^2 L^2}{R} = R \cdot \frac{\omega_p^2 L^2}{R^2} = RQ^2.$$

2. Перейти за посиланням

https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-ac/latest/circuit-construction-kit-ac_all.html?locale=uk.

Запустити симуляцію та опрацювати можливі функції. Додайте до

звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання.

Зберіть коло згідно наведеного скриншота.

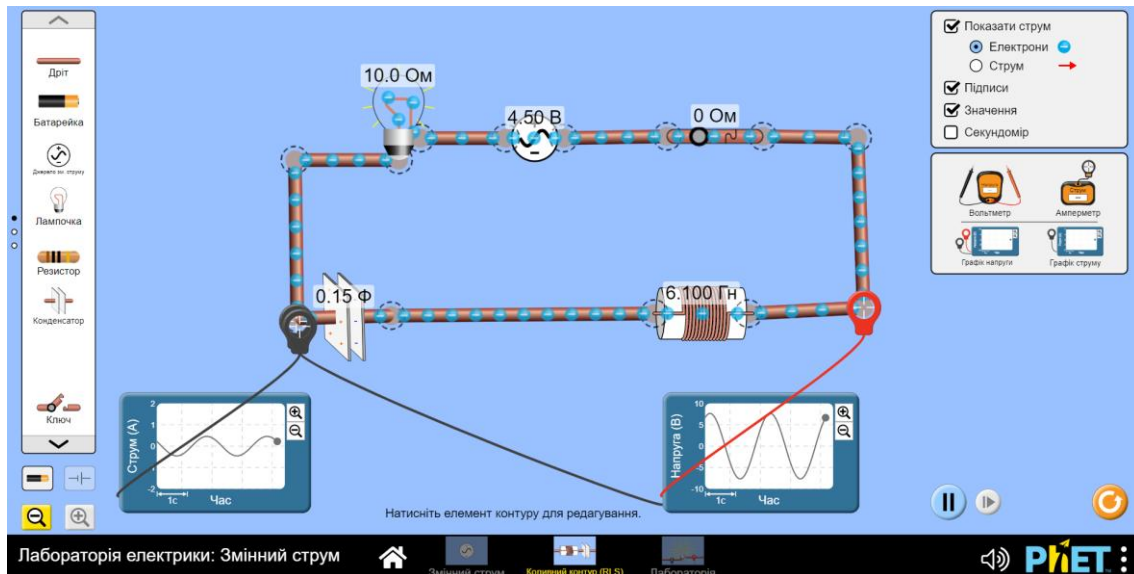


Рисунок 5.2 - Зображення схеми для даної роботи

3. Визначить за графіками струму і напруги амплітудні (максимальні) значення I_{\max} і U_{\max} , а за ними діючі значення напруги і сили струму. За ними визначить повний опір в колі змінного струму.

4. Натисніть на лампочку і дізнайтесь її опір. В даній роботі опір з'єднувальних провідників малий, ним можна знехтувати.

5. Натисніть на конденсатор і дізнайтесь його опір, також натисніть на котушку і дізнайтесь її опір. Запишіть отримані значення в таблицю.

6. За допомогою секундоміра визначить період коливань, а за ним і частоту змінного струму в даному колі. Якщо важко знайти час одного повного коливання – візьміть декілька коливань.

7. Знайдіть індуктивний і ємнісний опір за формулами. За отриманими значеннями знайдіть повний опір кола. Порівняйте отримані значення і обчисліть похибку за формулою: $\varepsilon = \frac{|Z_1 - Z_2|}{Z_1} \cdot 100\%$



8. Змініть мікшером значення ємності конденсатора і індуктивності котушки та повторіть дослід.

Таблиця 5.1.

№	I, А	U, В	Z_1 , Ом	ν , Гц	C, Ф	L, Гн	X_L , Ом	X_C , Ом	Z_2 , Ом	ε , %
1										
2										

9. Перевірити за допомогою симуляції результати розрахунків та підтвердити це за допомогою скріншотів екрану (один скріншотів на один дослід), зробіть висновок.

10. Підготувати звіт та надати його для перевірки.



Лабораторна робота №6 Ознайомлення та вивчення законів геометричної оптики

Мета: Лабораторна робота спрямована на ознайомлення студентів із законами геометричної оптики. Основна мета роботи полягає у вивченні залежностей між положенням тіла та лінзи й отриманого за їх допомогою зображення. Студенти мають навчитися вимірювати та аналізувати параметри, а також використовувати отримані дані для перевірки теоретичних положень з даної теми. Ця робота формує навички експериментального дослідження величин, розвиває вміння обробляти результати вимірювань, оцінювати похибки і формулювати висновки.

Обладнання:

Лабораторна робота виконується у віртуальному середовищі за допомогою симуляції «Геометрична оптика. Основи» на платформі [PhET Interactive Simulations](#). Для успішного виконання роботи необхідні наступні ресурси та обладнання:

1. Персональний комп'ютер або ноутбук
 - Операційна система: Windows, macOS, Linux.
 - Веббраузер: сучасна версія Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge або Safari.
2. Доступ до інтернету
 - Для завантаження та використання симуляції.
3. Симуляція «Геометрична оптика. Основи»
 - Інтерактивне середовище з можливістю моделювання різних параметрів (відстань, фокусна відстань тощо).
4. Текстовий редактор
 - Для підготовки звіту (Microsoft Word, Google Docs або аналогічний).
5. Калькулятор
 - Для проведення розрахунків під час обробки отриманих даних.



6. Методичні рекомендації

- Інструкція для виконання роботи із зазначенням мети, порядку дій, та формул для розрахунків.

7. Візуалізаційні інструменти

- Можливість будувати графіки залежностей за допомогою графічних програм або вбудованих засобів симуляції.

Цей набір ресурсів забезпечує зручне проведення експериментів, точний аналіз результатів і якісне виконання лабораторної роботи.

Хід роботи:

1. Ознайомитись з наведеним теоретичним матеріалом за темою

Довжини світлових хвиль, які сприймає око, дуже малі (0,4 ... 0,76 мкм). Тому поширення світла можна в деяких випадках розглядати, не беручи до уваги його хвильової природи і вважаючи, що світло поширюється вздовж деяких ліній, які називають променями. Інакше кажучи, ми ототожнюємо просторовий циліндр, в якому поширюється дія першої зони Френеля, з геометричною лінією, яка в ізотропному середовищі перпендикулярна до хвильових поверхонь.

Розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світлової енергії в прозорих середовищах на основі уявлення про світловий промінь, як лінію, вздовж якої переноситься світлова енергія, називається геометричною оптикою. Геометрична оптика є граничним випадком хвильової оптики, коли довжина хвилі вважається такою, що дорівнює нулю.

Геометрична оптика базується на таких експериментально встановлених принципах і законах: принцип прямолінійності поширення променів в однорідному ізотропному середовищі (цей принцип порушується при проходженні світла крізь дуже малі отвори – виникає явище дифракції); принцип незалежного поширення пучків світла – світлові промені не дуже великої інтенсивності, перетинаючись у просторі, не впливають один на одного (цей принцип може порушуватися, коли



лазерні пучки великої інтенсивності змінюють оптичні властивості середовища, внаслідок нагріву, наприклад); закони відбиття, за якими падаючий промінь, перпендикуляр до поверхні відбиття у точці падіння променя і відбитий промінь лежать в одній площині; кут падіння чисельно дорівнює куту відбиття; закони заломлення: а) падаючий і заломлений промені та перпендикуляр до поверхні поділу середовищ у точці падіння лежать в одній площині; б) відношення синусів кутів падіння і заломлення дорівнює відношенню швидкостей v_1 і v_2 світла в тих середовищах, в яких ці кути знаходяться: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$; це відношення називають відносним показником заломлювання n_{12} другого середовища відносно першого.

З теорії Максвелла відомо, що $v_1 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}} = \frac{c}{n_1}$, $v_2 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}} = \frac{c}{n_2}$. Тоді закон заломлення запишеться так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

тобто відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення дорівнює відношенню швидкості поширення світла в першому середовищі до швидкості поширення світла в другому середовищі. Нагадаємо, що $n_1 = \frac{c}{v_1}$ і $n_2 = \frac{c}{v_2}$ – абсолютні показники заломлювання першого і другого середовищ, $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ – відносний показник заломлювання другого середовища відносно першого.

Розглянуті закони відбивання і заломлення світла дозволяють сформулювати ще один закон геометричної оптики – закон оборотності світлових променів. Якщо промінь падає з першого середовища на межу другого під кутом α , заломлюється на межі і переходить у друге середовище під кутом β , то промінь, пущений у зворотному напрямі з другого середовища під кутом β , вийде у першому середовищі під кутом α . Аналогічно буде і при відбиванні.



Прозоре тіло, обмежене двома сферичними поверхнями, називають лінзою. Зазвичай лінзу виготовляють зі скла. Як окремий випадок лінзи можна розглядати плоско-паралельну скляну пластинку, вважаючи площини сферами з нескінченно великим радіусом кривини.

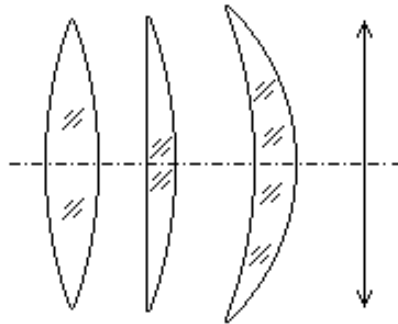


Рисунок 6.1 - Збирні лінзи

Якщо паралельні промені після заломлення в лінзі перетинаються в дійсній точці, то лінза називається збирною, або додатною. Якщо ж паралельні промені після заломлення в лінзі стають розбіжними, то лінза називається розсіювальною, або від'ємною. Якщо матеріал лінзи заломлює більше, ніж навколишнє середовище, – наприклад, скляна лінза в повітрі, – то збирними лінзами будуть лінзи двоопуклі, плоско-опуклі і вгнуто-опуклі, тобто лінзи, що потовщуються до середини, до розсіювальних же лінз належать двовгнуті, плоско-вгнуті і опукло-вгнуті, тобто лінзи, які потоншуються до середини.

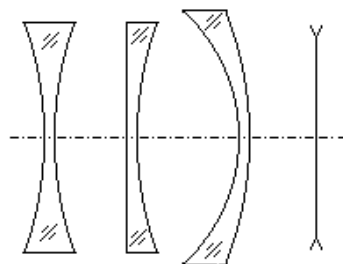


Рисунок 6.2 - Розсіювальні лінзи



Лінза використовується як складова частина центрованої оптичної системи. Тому пряма, яка проходить через центри сферичних поверхонь, що обмежують лінзу, називається її головною оптичною віссю.

Точка, в якій після заломлення в збирній лінзі збираються промені, що падають на лінзу паралельно до головної оптичної осі, називається головним фокусом лінзи. Цю точку позначають буквою F . Промені, паралельні до головної оптичної осі, можна спрямувати на лінзу і з протилежного боку. Точка, в якій вони зйдуться, пройшовши лінзу, це другий головний фокус. На відміну від сферичного дзеркала лінза має два головних фокуси. В однорідному середовищі вони розміщені на однаковій віддалі від лінзи по обидва боки. Ця віддаль називається фокусною віддаллю лінзи і позначається буквою F (тією самою, що й фокуси).

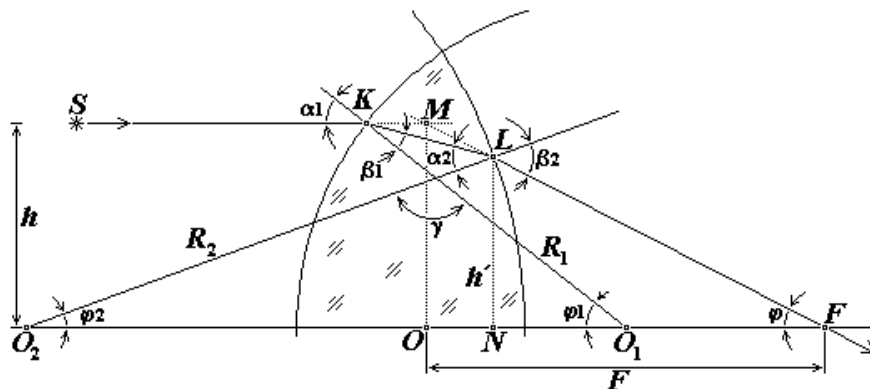


Рисунок 6.3 - Хід променів в лінзі

Величину, обернену до фокусної віддалі, називають оптичною силою лінзи: $D = \frac{1}{F}$. Чим ближчі до лінзи її фокуси, тим вона сильніше заломлює промені, збираючи або розсіюючи їх, і тим більшою за абсолютною величиною є оптична сила лінзи. Оптичну силу D лінз вимірюють у діоптріях: $[D] = \text{дптр}$. Оптичну силу 1 дптр має лінза з фокусною віддаллю 1 м.

Формула оптичної сили тонкої лінзи:

$$D = \frac{1}{F} = (n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

З цієї формули витікає, що фокусні віддалі по обидва боки лінзи в однорідному середовищі однакові. Ця формула справедлива не лише для двоопуклої лінзи, а й для всіх інших типів лінз, якщо радіуси вгнутих поверхонь вважати від'ємними, а радіуси опуклих – додатними. Тоді фокусна віддаль F і оптична сила D збирної лінзи будуть додатними, а розсіювальної лінзи – від'ємними.

Площина, яка проходить через фокус F перпендикулярно до головної оптичної осі, називається фокальною площиною. Якщо промені йдуть паралельним пучком, але під кутом до головної оптичної осі (у напрямі побічної оптичної осі), то вони перетинаються у відповідній точці A фокальної площини.

Розглянуті властивості тонких лінз дають змогу геометрично побудувати зображення предмета, як сукупність зображень всіх його окремих точок. Якщо предмет лінійний, то достатньо побудувати зображення двох крайніх його точок. Для знаходження зображення кожної окремої точки предмета треба прослідкувати шляхи променів, що виходять із цієї точки, після їх заломлення в лінзі і знайти точку їх перетину. Але геометричну точку визначає перетин мінімум двох ліній, тому для побудови зображення точки достатньо знати хід двох променів.

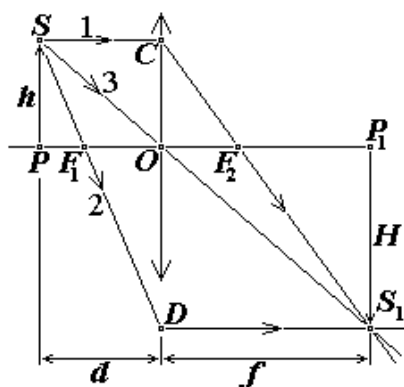


Рисунок 6.4 - Побудова зображення в збирній лінзі



Із властивостей тонкої лінзи можна легко встановити хід трьох променів, для збирної лінзи і для розсіювальної лінзи:

1) Промінь, паралельний до головної оптичної осі, після заломлення в лінзі проходить через головний фокус F_2 ; для розсіювальної лінзи заломлюється так, що його продовження проходить через головний фокус F_2 ;

2) Промінь, який проходить через головний фокус F_1 , після заломлення в лінзі йде паралельно до головної оптичної осі; для розсіювальної лінзи промінь, продовження якого проходить через головний фокус F_1 , після заломлення в лінзі йде паралельно до головної оптичної осі;

3) Промінь, який проходить через оптичний центр O , не заломлюється в лінзі.

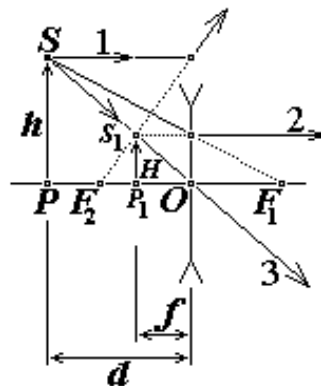


Рисунок 6.5 - Побудова зображення в розсіювальній лінзі

Формула тонкої лінзи:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

Величини d , f і F можуть бути додатними і від'ємними. Перед величинами у формулі лінзи знаки слід ставити за таким правилом. Якщо



лінза збирна, то її фокус дійсний і фокусна віддаль F вважається додатною. Коли ж лінза розсіювальна, то фокусна віддаль F вважається від'ємною. Відстань f від лінзи до зображення додатна, якщо зображення дійсне, і від'ємна – коли уявне. Нарешті, відстань d від предмета до лінзи додатна, якщо предмет дійсний, і від'ємна, коли він уявний, тобто коли на лінзу падає система збіжних пучків променів, і продовження променів кожного збіжного пучка перетинаються з деякій точці, яка є точкою уявного предмета.

Збільшення лінзи

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

2. Перейти за посиланням https://phet.colorado.edu/sims/html/geometric-optics-basics/latest/geometric-optics-basics_all.html?locale=uk.

Запустити симуляцію та опрацювати можливі функції. Додайте до звіту скриншоти (2-3 шт.), що підтверджують виконання завдання.

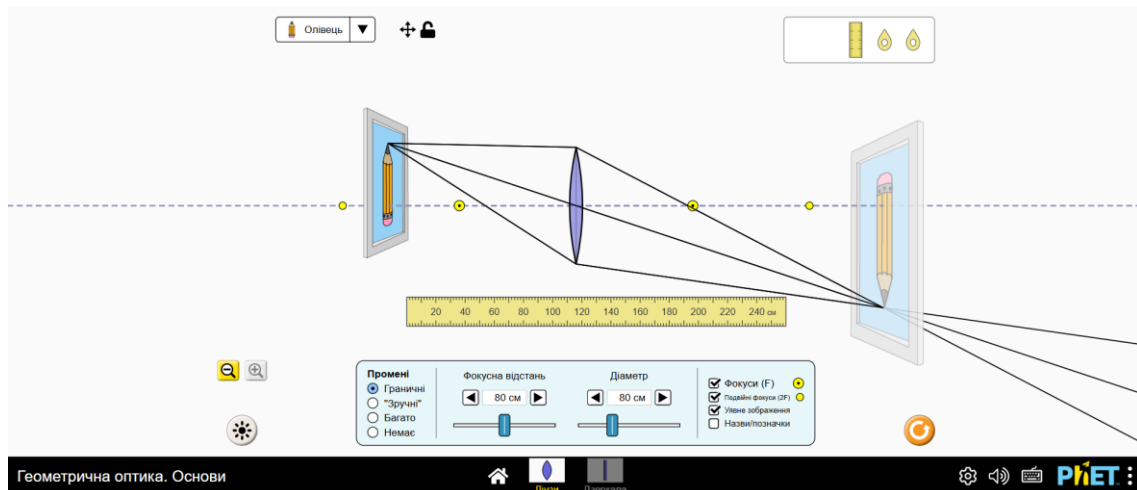


Рисунок 6.6 - Приклад опрацювання симуляції «Геометрична оптика. Основи»



3. Виходячи із наданих параметрів за допомогою формул п. 1 зробити вимірювання, зробити розрахунки та перевірити співвідношення:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Обчислити збільшення лінзи для кожного дослідів та заповнити таблицю:

Таблиця 6.1.

№	Положення	F, м	d, м	f, м	Співвідношення виконується	Г
1	$0 < d < F$					
2	$d = F$					
3	$F < d < 2F$					
4	$d = 2F$					
5	$2F < d$					

4. Перевірити за допомогою симуляції результати розрахунків та підтвердити це за допомогою скріншотів екрану (один скріншот на один дослід), зробіть висновок.

5. Підготувати звіт та надати його для перевірки.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Clark A., Collett Ch., Fadem B. MC: Physics 121 - General Physics. LibreTexts. 2021. 657 p. URL: <https://read.kortext.com/library/books/997010>.
2. Kaidan V., Velychko V., Fedorenko E., Kaidan N. The use of computer modeling in the educational process based on the example of studying Coulomb's law. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2871, XVI International Conference on Mathematics, Science and Technology Education (ICon-MaSTEd 2024). Kryvyi Rih, Ukraine. 2024. Vol. 2871. № 01201. DOI: 10.1088/1742-6596/2871/1/012014.
3. Дідух Л. Д. Електрика та магнетизм : підручник Тернопіль : Підручники і посібники, 2020. 464 с.
4. Інтерактивні симуляції для природничих наук і математики : веб-сайт. URL: <https://phet.colorado.edu/uk/>.
5. Мічіо Кайку. Фізика майбутнього / пер. з англ. А. Кам'янець. Львів : Літопис, 2018. 432 с. URL: <http://flibusta.is/b/436614>.
6. Правда М. І. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ III. Електрика та магнетизм. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 56 с.
7. Правда М. І. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ I. Механіка. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 55 с.
8. Прошкін С. С. Фізика. Словник-довідник : в 2 ч . : довідник для СПО. 2-е вид., Стереотип. 2019.
9. Роганков В. Б. 50 Лекцій з фізики для закладів вищої технічної освіти : підручник. Київ : Освіта України, 2019. 412 с.
10. Сергеева О. Є., Федосов С. Н., Термінологічний фізичний словник : навчальний посібник. Одеса : ОНАХТ, 2020. 65 с.
11. Фелінський Г. С. Загальна фізика : підручник. Київ : Каравела, 2020. 656 с.
12. Ящинський Л. В., Коровицький А. М. Фізика : конспект лекцій для студентів технічних напрямів підготовки денної та заочної форм навчання. Луцьк : Луцький НТУ, 2019. 60 с.



Навчально-методичне видання

Кайдан Вадим Петрович

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

**до виконання лабораторних робіт змістових модулів
«Основи молекулярної фізики і термодинаміки»,
«Електрика і магнетизм» та «Оптика та фізика
мікрочастинок» з дисципліни «Фізика»**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції