

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ М. П. ДРАГОМАНОВА**

На правах рукопису

КУЛЬЧИЦЬКИЙ ВІКТОР ІВАНОВИЧ

УДК 537.8 (07) (043)

**ФОРМУВАННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ПОНЯТЬ В УЧНІВ
ПРОФІЛЬНИХ КЛАСІВ У ПРОЦЕСІ ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ**

Спеціальність 13. 00. 02 – теорія та методика навчання (фізика)

ДИСЕРТАЦІЯ
на здобуття наукового ступеня
кандидата педагогічних наук

Науковий керівник:
кандидат педагогічних наук,
професор
Коршак Євгеній Васильович

Київ – 2010

ЗМІСТ

Вступ	4
Розділ I. Теоретико-методологічні засади формування фундаментальних фізичних понять.....	15
1.1. Фундаментальні фізичні поняття в структурі навчального предмету фізики	15
1.1.1. Науково-методичний аналіз фундаментальних фізичних понять	15
1.1.2. Місце фундаментальних фізичних понять у шкільному курсі фізики	21
1.2. Аналіз методичних підходів вивчення електродинаміки	25
1.3. Аналіз психолого-педагогічних та дидактичних підходів формування фундаментальних фізичних понять.....	33
1.3.1. Психолого-педагогічні основи формування понять	33
1.3.2. Дидактичні основи формування фундаментальних фізичних понять	42
1.4. Методологічні аспекти формування фундаментальних фізичних понять ..	47
Висновки до першого розділу	55
Розділ II. Методика формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних (фізичних, фізико - математичних і фізико - технічних) класів у процесі вивчення електродинаміки	56
2.1. Формування фундаментальних фізичних понять електричного заряду, електричного та електростатичного поля, потенціальності електростатичного поля, потоку електричного поля в учнів профільних класів	56
2.2. Використання ідей симетрії, відносності та інваріантності електричного заряду при формуванні поняття магнітне поле	70
2.3. Вивчення законів постійного струму та розв'язання задач на обчислення опору кіл з використанням принципу симетрії	83
2.4. Формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електромагнітної індукції та вихрового електричного поля.....	89

2.5. Формування понять симетрії, невизначеності, відносності при вивченні електричних струмів в різних середовищах	99
2.6. Формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електромагнітного поля	112
2.7. Вивчення теми “Електромагнітні коливання” на основі енергетичного підходу та аналогії із механічними коливаннями	123
2.8. Формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електромагнітних хвиль з використанням сучасних інформаційних технологій	129
2.9. Формування фундаментальних фізичних понять (симетрія, відносність, взаємодія, ймовірність, невизначеність, фотон) в учнів профільних класів у процесі вивчення світлових хвиль з використанням сучасних інформаційних технологій	138
Висновки до другого розділу	156
Розділ III. Організація, методика проведення і результати педагогічного експерименту	158
3.1. Експертні оцінки навчальних матеріалів із методики формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки	158
3.2. Діагностично – прогностична оцінка результатів ефективності експериментальної і традиційної методик викладання шкільного курсу електродинаміки у профільних класах. Аналіз результатів перевірконо – оціночної діяльності учнів.....	167
Висновки до третього розділу.....	176
Висновки.....	178
Список використаних джерел.....	181
Додаток А	205

ВСТУП

Актуальність дослідження. Однією з кардинальних змін фізичної освіти в школі стає її методологічна спрямованість. Необхідність наукового осмислення концептуальних положень нового сучасного курсу шкільної фізики, його можливих структур, змісту, конструювання навчального матеріалу навколо фундаментальних фізичних понять та обґрунтування відповідної методики навчання є актуальними теоретичними і практичними потребами. На це й націлює Державна національна програма “Освіта” (“Україна XXI століття”) [74]. Відповідно до неї розроблено концепцію загальноосвітньої школи [102] та концепції неперервної освіти з усіх предметів, у тому числі й фізики [101; 155; 190]. Виходячи із концептуальних основ державного стандарту фізичної освіти [56; 57; 130; 172; 173; 200; 201], розроблено нову навчальну програма “Фізика. Астрономія, 7–11 класи”.

Головна мета навчання фізики в середній школі полягає в розвитку особистості учнів засобами фізики як навчального предмета, зокрема завдяки формуванню в них фізичних знань, наукового світогляду і відповідного стилю мислення. Відповідно до цього, зміст фізичної освіти спрямовано на опанування учнями наукових фактів і фундаментальних ідей, усвідомлення ними суті понять і законів, принципів і теорій, оволодіння основними методами наукового пізнання і використання набутих знань в практичній діяльності.

У старшій школі загальноосвітня підготовка з фізики продовжується на засадах профільного навчання. **Програма профільного навчання фізики** передбачає систематизоване вивчення основних фізичних теорій, формування світогляду і наукового стилю мислення учнів на основі фізичної картини світу, оволодіння методами наукового пізнання та усвідомлення фізичного знання на рівні, необхідному для подальшого його використання в професійній діяльності та продовженні фізичної освіти. **Основними профілями навчання**, де фізика вивчається на такому рівні, є **фізичний, фізико-математичний і фізико-технічний.**

Рівень сформованості в учнів наукового способу мислення в значній мірі визначається тим, як вони засвоїли основні фізичні узагальнення на всіх рівнях: поняття, закони, теорії, принципи, фізичну картину світу. При цьому основну увагу звертають на основи фізики і узгоджене викладання фундаментальних ідей СТВ, квантової і статистичної фізики. Структуру навчального матеріалу, організацію навчального процесу, які визначають у своїй сукупності послідовність мислення учнів у процесі пізнання, будують відповідно до етапів теоретичного узагальнення. Проте, хоча діючі програми, підручники та методичні посібники і побудовані на основі принципу циклічності, сформованість наукового мислення випускників шкіл посередня. Представлення фізики як лінійної послідовності понять на практиці часто замінюється лінійною послідовністю теорій. Але сучасні фізичні теорії побудовані на основі конструктивного підходу.

Аналіз показує, що у **профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класах** виникає потреба оволодіння учнями такими засобами пізнання, які містять змістовно цілісне знання про об'єкт, уособлюють у собі розуміння об'єкту пізнання, відображають особистісний аспект пізнання.

Тоді вивчення фізичних теорій постає не як проблема адаптації їх змісту (і представлення “випрямленого” шляху становлення теорій), а як проблема пошуку таких навчальних конструктів, які б забезпечували максимальну кількість зв'язків між змістовними елементами. Такими конструктами, як показує дослідження, є фундаментальні фізичні поняття. Як визначальні компоненти сучасних фізичних теорій, вони відображають відповідні (високих) теоретичні рівні і, разом з тим, можуть бути покладені в основу вивчення класичних за змістом курсів. У такий спосіб вдається підвищити науковий рівень останніх, а в кінцевому випадку – формувати в учнів сучасний науковий спосіб мислення протягом вивчення всього курсу фізики.

Фундаментальне поняття (від лат. *fundamentum* – основа) – категорія науки, доведена експериментально і теоретично, на основі якої розвиваються нові напрямки в науці.

До фундаментальних фізичних понять відносимо такі, що:

1) відображають фундаментальні властивості природи і одночасно є універсальними засобами пізнання (симетрія, невизначеність, відносність, ймовірність);

2) несуть інформацію про основоположні властивості матерії (поле, фотон, фізичний вакуум, фундаментальні взаємодії, фундаментальні частинки, фундаментальні константи);

3) належать до природничо – наукових категорій (енергія, імпульс, момент імпульсу, маса, заряд).

Постає актуальна проблема надання фундаментальним фізичним поняттям (ФФП) у навчанні місця, адекватного їх статусу в науці – інтегруючих, інваріантних засобів пізнання в різних фізичних теоріях.

Теоретичне обґрунтування принципів відбору і конструювання навчального матеріалу шкільного курсу фізики та формування в учнів наукового способу мислення розглядалися у дисертаційних дослідженнях:

– історичного аспекту вивчення фізики у школі. Це фундаментальні ідеї про ядро і оболонку змісту освіти та тенденції його зміни (О.І. Бугайов [15], С.У. Гончаренко [58], Ю.І. Дік [78], Л.Я. Зоріна [89], В.Г. Разумовський [176], О.В. Сергєєв [191], та інші), вивчення фундаментальних дослідів у загальноосвітній школі (Д.Я. Костюкевич, Б.Ю. Миргородський [105]);

– теорії і практики різних структурних побудов шкільних курсів фізики (К.Д. Краєвич, Н.А. Любимов, О.В. Пьоришкін [159], В.Г. Разумовський [176], Л.І. Резніков, Н.О. Родіна, І.І. Соколов, М.І. Садовий [186]);

– обґрунтування принципів відбору і конструювання навчального матеріалу (О.І. Бугайов [15], Н.К. Гладишева [52], С.У. Гончаренко [58], Е.Ю. Евенчик, В.Р. Ільченко [91], Є.В. Коршак [105], О.І. Ляшенко [128], В.В. Мултановський [147], А.А. Пінський [165], О.В. Пьоришкін [159], В.Г. Разумовський [176], О.В. Сергєєв [191], Н.О. Родіна, Л.В. Тарасов [208]);

– закономірностей формування наукових понять, системи знань, вмінь і навичок (Б.Є. Будний [23], Є.В. Коршак [105], О.І. Ляшенко [128],

А.І. Павленко [160], М.І. Садовий [186], А.В. Усова [213] та інші);

- виховання природничо-наукового світогляду на основі методологічних знань і відповідного йому науково-теоретичного способу мислення (Г.Л. Голін [54], С.У. Гончаренко [58], Л.Я. Зоріна [89], Б.Г. Кременський [107], В.М. Мощанський [145], В.Г. Разумовський [176], О.В. Сергєєв [191], В.І. Савченко [184], М.І. Садовий [186], М.І. Шут [235] та інші);

- вивчення прикладних питань шкільної фізики (Є.В. Коршак [105], Л.В. Тарасов [208], М.І. Садовий [186], М.І. Шут [235] та інші);

- всебічний розвиток особистості учня в процесі вивчення ним основ наук (С.У. Гончаренко [58], І.Я. Ланіна [124], В.Г. Разумовський [176] та інші);

- диференціації навчання (О.І. Бугайов [15], М.Т. Мартинюк [135], Н.С. Пуришева [174], О.В. Сергєєв [191], М.І. Шут [235] і інші);

- міжпредметних зв'язків фізики (А.Є. Гуревич [68], В.Р. Ільченко [91], В.Г. Разумовський [176], О.В. Сергєєв [191], М.І. Шут [235] і інші);

- перевірки результативності вивчення фізики (О.І. Бугайов [15], С.У. Гончаренко [58], О.І. Ляшенко [128], А.А. Пінський [165], В.Г. Разумовський [176], О.В. Сергєєв [191], М.І. Шут [235] і інші).

- використання сучасних інформаційних технологій при викладанні шкільного курсу фізики (Ю.О. Жук [84], О.М. Соколюк [84], О.І. Іваницький [92], М.І. Жалдак [98] і інші).

Високо оцінюючи наукове і практичне значення виконаних досліджень проблеми формування фундаментальних фізичних понять в учнів, слід зазначити, що, у зв'язку із переходом на профільне навчання деякі її аспекти потребують нових досліджень. Уже сьогодні старша школа функціонує як профільна, що вимагає зміни цілей, змісту, структури та методики викладання курсу фізики. Це зумовлює нові підходи до розроблення методики формування ФФП в умовах профільного навчання, особливо в класах, де фізика вивчається поглиблено (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних).

Ряд ФФП сучасної фізики (“симетрія”, “невизначеність” і ін.) не знайшли свого відображення в діючій програмі з фізики для профільних класів, хоча

вони є доступні і суттєво впливають на формування наукового способу мислення учнів. Не одержують завершення знання учнів профільних класів про властивості мікрооб'єктів, про співвідношення між законами квантово-релятивістської та класичної фізики, немає розуміння об'єктивного характеру статистичних закономірностей та їх зв'язку з динамічними закономірностями.

Проте принципове завдання полягає не тільки в тому, щоб знайти місце для ФФП в існуючому курсі фізики (електродинаміки) для профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів, а у методології сучасної фізики. Це ускладнюється тим, що методологія сучасної фізики не може бути перенесена механічно в навчальний процес, а потребує трансформації до такого рівня, щоб її можна було ефективно використовувати в педагогічних цілях.

Викладені вище обставини і зумовили вибір теми дисертаційного дослідження «Формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано відповідно до плану науково – дослідної роботи кафедри теорії та методики навчання фізики та астрономії Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова «Теорія і методика навчання фізики у загальноосвітній школі». Тему дослідження затверджено Вченою радою Тернопільського національного педагогічного університету імені В. Гнатюка (протокол № 5 від 26 грудня 2006 р.), Вченою радою Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова (протокол № 6 від 5 березня 2009 р.) та узгоджено Міжвідомчою радою з координації наукових досліджень педагогічних і психологічних наук в Україні (протокол № 6 від 29 вересня 2009 р.).

Об'єкт дослідження – навчально-виховний процес з фізики учнів профільних класів.

Предмет дослідження – структура і методика навчання електродинаміки учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів.

Мета дослідження — теоретичне обґрунтування, вдосконалення, розробка і експериментальна перевірка методики формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення електродинаміки.

В основу дослідження покладено **гіпотезу**: якщо формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки вести з врахуванням специфіки функціонування їх у науці (класичній та квантовій електродинаміці), то це: 1) приведе не тільки до вдосконалення традиційної, але й до побудови принципово нової методики навчання електродинаміки на засадах профільного навчання; 2) підвищить ефективність та результативність навчання за умов його профільної диференціації; 3) буде сприяти формуванню наукового способу мислення учнів профільних класів та розвитку у них інтегруючих, інваріантних засобів пізнання.

Досягнення поставленої мети передбачало вирішення таких основних **завдань** дисертаційного дослідження:

1) з'ясувати сучасний стан проблеми формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки, з'ясувати психолого – педагогічні та методичні аспекти їх формування, провести аналіз методології класичної та квантової електродинаміки, довести педагогічну доцільність формування фундаментальних фізичних понять у процесі вивчення електродинаміки;

2) вдосконалити методичну модель процесу формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів;

3) обґрунтувати і розробити методику формування системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітна взаємодія, електромагнітне поле, електромагнітна хвиля, фотон та ін.) в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка»;

4) розробити методику вивчення розділу «Електродинаміка» на основі системи фундаментальних фізичних понять для учнів профільних класів, обґрунтувати необхідність побудови розділу «Електродинаміка» для учнів профільних класів на основі методології сучасної фізики;

5) перевірити в ході педагогічного експерименту доступність, ефективність та результативність запропонованої методики формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка».

Для досягнення поставленої мети, виконання завдань і перевірки гіпотези дослідження застосовувалися такі **методи дослідження**:

Теоретичні: аналіз, систематизація і узагальнення науково – методичної, психолого – педагогічної літератури з досліджуваної проблеми; історична реконструкція формування фундаментальних фізичних понять в науці і аналіз сучасних фізичних теорій; дидактичне моделювання процесу формування понять; логіко – методологічний аналіз змісту, структури і методики навчання електродинаміки в учнів профільних класів, методики формування і розвитку в учнів профільних класів системи фундаментальних фізичних понять у процесі вивчення електродинаміки; аналіз шкільних програм, підручників, навчальних посібників.

Емпіричні: цілеспрямовані педагогічні спостереження в процесі освоєння учнями профільних класів електродинаміки; вивчення та узагальнення передового досвіду вчителів та методистів з досліджуваної проблеми; аналіз експертних оцінок науковців та вчителів; анкетування і тестування вчителів та учнів, аналіз усних і письмових робіт учнів; педагогічний експеримент (констатуючий, пошуковий, формуючий) і аналіз його результатів з використанням апарату математичної статистики.

Наукова новизна і теоретичне значення одержаних результатів полягає в тому, що **вперше**:

1. Обґрунтовано, що генералізація та систематизація розділу «Електродинаміка» для учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і

фізико-технічних) класів ефективно здійснюється на основі системи фундаментальних фізичних понять.

2. Вдосконалено методичну модель процесу формування системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, фотон та ін.) в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка», яка будується на основі конструктивного та системного підходів та полягає у конструюванні фундаментальних фізичних понять як теоретичних узагальнень при збереженні їх емпіричної основи.

3. Запропоновано модель організації навчально-виховного процесу з фізики (розділу «Електродинаміка») на основі системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, фотон та ін.) для учнів профільних класів, у якій при побудові структурно-логічних схем вивчення всіх підрозділів чільне місце займають фундаментальні фізичні поняття та ідеї фізичної науки, як основні дидактичні одиниці змісту розділу «Електродинаміка» для профільних класів.

4. Отримали подальший розвиток ідеї, що об'єднуючою основою при вивченні всіх тем електродинаміки слугують поняття електромагнітного поля та електромагнітної взаємодії, адаптовані до сприйняття учнями профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів, а саме: формування понять електромагнітного поля та електромагнітної взаємодії на основі фундаментальних фізичних понять «симетрія», «відносність», «поле», «взаємодія», створює передумови для побудови квантової моделі електромагнітного випромінювання без логічного конфлікту із знаннями, здобутими учнями під час вивчення розділу «Електродинаміка».

Практичне значення дослідження полягає у розробці та апробації методичного забезпечення навчально-виховного процесу з фізики у профільних

класах, що сприяє формуванню в учнів системи фундаментальних фізичних понять у процесі вивчення розділу «Електродинаміка». Зокрема:

1) розроблено методичку формування системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, електромагнітна хвиля, фотон та ін.) в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка»;

2) розроблено методичку вивчення розділу «Електродинаміка» на основі системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, фотон та ін.) для учнів профільних класів, у якій при побудові структурно-логічних схем вивчення всіх підрозділів чільне місце займають фундаментальні фізичні поняття та ідеї фізичної науки, як основні структурні елементи змісту розділу «Електродинаміка» для профільних класів.

3) систематизовано розділ «Електродинаміка» для учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів на основі системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія та ін.);

4) розроблено та апробовано інформаційно-методичне забезпечення для формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка»;

5) розроблено методичку демонстраційного експерименту та лабораторних робіт фізичного практикуму на основі виготовленого вимірювального приладу для дослідження навантажувальної характеристики та реєстрації індукції магнітного поля розсіяння трансформатора.

Упровадження результатів дослідження здійснювалося у практиці роботи Тернопільського обласного комунального інституту післядипломної педагогічної освіти (довідка № 01/26 від 18.01.2010 р.), у процесі експериментального навчання учнів 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів: Тернопільського педагогічного ліцею (довідка № 152 від 18.06.2009

р.) , Тернопільської загальноосвітньої школи I-III ступенів № 11 (довідка № 169 від 30. 12. 2009 р.), Тернопільської загальноосвітньої школи I-III ступенів № 27 (довідка № 26 від 26. 01. 2010 р.). На різних етапах дослідження у експерименті брали участь 764 учні 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів.

Особистий внесок здобувача у працях, опублікованих разом із співавторами полягає у:

– розробці та апробації методики формування понять електромагнітна індукція та вихрове електричне поле на основі фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки;

– розробці та апробації методики формування поняття електромагнітного поля на основі системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, відносність, електромагнітна взаємодія) в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки;

– удосконаленню та апробації методики демонстраційного експерименту та лабораторних робіт фізичного практикуму по дослідженню навантажувальної характеристики та реєстрації індукції магнітного поля розсіяння трансформатора в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки, розробці приладу для реєстрації та дослідження індукції магнітного поля розсіяння трансформатора;

– розробці та апробації методики формування поняття імовірності в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення молекулярної фізики та електродинаміки.

Апробація результатів дослідження. Основні теоретичні та практичні результати дослідження було представлено в доповідях та повідомленнях на наукових, науково-практичних та науково-методичних конференціях різного рівня, зокрема: на Міжнародному семінарі «Розвиток творчих здібностей учнів в процесі навчання фізики» (Чернігів, 1996 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Стандарти фізичної освіти в середній школі України» (Чернігів, 1996 р.); Всеукраїнській конференції «Стандарти фізичної освіти в

Україні: технологічні аспекти управління навчально-пізнавальною діяльністю» (Кам'янець-Подільський, 1997 р.); Всеукраїнській конференції «Методичні особливості викладання фізики на сучасному етапі» (Кіровоград, 1998); Всеукраїнській науково-методичній конференції «Проблеми підручників і посібників з математики, фізики та основ інформатики» (Тернопіль, 2002 р.); Всеукраїнському науково-методичному семінарі «Актуальні питання методики навчання фізики та астрономії в середній і вищій школі» Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова (Київ, 2009 р.).

Основні положення та результати проведеного дослідження обговорювалися на засіданнях кафедри теорії та методики навчання фізики і астрономії фізико-математичного інституту Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова, наукових конференціях та засіданнях кафедри фізики та методики викладання фізики Тернопільського державного педагогічного університету імені В. Гнатюка, семінарах методичного об'єднання вчителів фізики при Тернопільському обласному комунальному інституті післядипломної педагогічної освіти.

Публікації. Результати дослідження висвітлено в 13 наукових працях, з яких 10 – у фахових виданнях, затверджених ВАК України, 5 із яких одноосібні.

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 235 сторінок, з яких 180 сторінок основного тексту, список використаних джерел налічує 247 найменувань. Робота містить 11 таблиць, 70 рисунків.

РОЗДІЛ I

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ПОНЯТЬ

1.1. Фундаментальні фізичні поняття в структурі навчального предмету фізики

1.1.1. Науково – методичний аналіз фундаментальних фізичних понять.

Кожна наука відображає предмет свого дослідження в поняттях, без яких неможливо побудувати ні однієї теорії, яка пояснює пізнавальну дійсність. При цьому діалектика пізнання така, що нове знання постає в оболонці старих понять, а тому кожна така оболонка може виявитися надто вузькою для того, щоб включити в себе новий досвід [9]. В результаті постає питання про перегляд понять, їх уточнення або переосмислення.

Можна припустити, що причина труднощів, які виникають при засвоєнні кожної нової теорії, завжди одна і та ж: спроба представити нову теорію в поняттях тих ідей, які існували раніше. Підтвердженням цьому служить проведений психологічний аналіз формування понять, а також аналіз етапів становлення як класичних, так і сучасних фізичних теорій [3; 123; 202; 215].

Так, Максвелл у передмові до «Трактату про електрику і магнетизм» писав, що докладе всіх зусиль для того, щоб представити якомога ясніше співвідношення між математичною формою цієї теорії і математичною формою фундаментальної науки про динаміку, щоб можна було в якійсь мірі підготуватися до вибору тих динамічних явищ, які використовуватимуть для пояснення явищ електромагнітних [133; 192, с. 12-14]. Він все ще намагався подати свою теорію (як стало зрозуміло потім, фундаментальну теорію) мовою фундаментальної класичної механіки Ньютона. Здавалося, що зрозуміти і наочно представити електромагнітне поле інакше, як в термінах якоїсь механічної моделі, неможливо.

Традиційний підхід до побудови наукових теорій спирається на

розуміння фізичної теорії як гіпотетико-дедуктивної системи, що будується на аксіоматичній основі [53; 54; 144,]. Однак методологічні дослідження [10; 146; 201; 202] свідчать, що логіко-дедуктивна структура фізичної теорії пов'язана із виведенням сукупності наслідків з основних рівнянь теорії і є складним інтуїтивним процесом. Щоб виявити істотні моменти в розвитку понятійної форми мислення, коротко проаналізуємо основні тенденції розвитку поняття симетрії в фізиці.

Відкриття спеціальної теорії відносності створило необхідні передумови для розвитку теоретико – інваріантного підходу в фізиці. Створення загальної теорії відносності і розробка концепції збереження на загальнорелятивістській основі підготували новий етап в розвитку вчення про симетрію – становлення теорем Е.Нетер, які відкривають глибоку єдність симетрії і збереження, а разом з тим і фундаментальну роль принципу симетрії в сучасній фізиці.

Взаємозв'язок симетрії і збереження, як відмічає В.П.Візгін, в межах класичної фізики має місце лише при умові, що фізична система має варіаційну структуру і об'єднуються не два фундаментальних класи принципів фізики (принцип симетрії і закони збереження), а три – (симетрія, збереження, екстремальність) [36; 37]. Найбільш загальним вираженням взаємозв'язку цих класів фізичних принципів і є теорема Нетер [35], встановлені нею в 1918 р.

Подальший розвиток вчення про симетрію тісно зв'язаний з виникненням квантової механіки, квантової теорії поля і фізики елементарних частинок. На цьому шляху були досягнуті наступні принципово важливі результати: по-перше, встановлені нові форми симетрії, зв'язані з дискретними групами (симетрія C , P , T) і виявлені відповідні їм закони збереження [121; 211; 212].

По-друге, розвинутий варіаційний формалізм для хвильових полів і створена на його основі схема канонічного квантування в теорії поля. “При такому підході першочергове значення набрали і теорема Нетер, на яких базувалось введення динамічних змінних, класифікація законів збереження і т.д.” [35, с. 205]. На цій базі в квантовій теорії поля і в фізиці елементарних частинок були встановлені різні динамічні (калібрувальні, ізотопічні) симетрії і

відповідні їм закони збереження.

Узагальнення ізотопічної симетрії привело до встановлення унітарної симетрії, на основі якої була здійснена систематизація сильної взаємодії частинок [215; 224].

По-третє, виявлено наближений характер багатьох динамічних симетрій. Наближені співвідношення симетрії “можуть виконуватися з великою точністю, при однакових умовах і істотно порушуватися при інших. Критичні умови можуть залежати від стану об’єкта і визначати тип явища” [34, с. 56]. Так, “симетрія сильної і слабкої взаємодії не є точною і порушується при включенні інших взаємодій” [34, с. 31]. Приблизний, відносний характер форм динамічної симетрії вказує на їх єдність з асиметрією. Відомо, що найбільш важливі результати в фізиці досягались саме тоді, коли встановлювались умови порушення симетрії і асиметрії [197].

Виступаючи в єдності з принципом інваріантності і структурності, принцип симетрії сприяє інтеграції, мінімізації знання, забезпечує пояснювальну, передбачувальну силу теоретичного узагальнення [63]. Гносеологічна функція принципу симетрії в сучасній науці тісно зв’язана з методами ідеалізації, формалізації, моделювання, аналогії і ін.

Орієнтуючи наукове пізнання на виявлення інваріантних відношень досліджуваних предметних областей світу, визначаючи сукупність відповідних вимог і операцій знаходження інваріантів групи перетворень, принцип симетрії представляє істотну логіку – методологічну передумову побудови фізичної теорії [64].

Проведений нами аналіз етапів становлення класичної та квантової електродинаміки (КЕД), квантової хромодинаміки (КХД), квантової ароматодинаміки (КАД) свідчить, що для них характерний не аксіоматичний, а конструктивний (генетичний) підхід до побудови теорії [3; 215; 217; 229; 230].

Наприклад, побудова квантової електродинаміки – це не виведення ряду наслідків з чітко сформульованих принципів, а послідовний ряд операцій, в результаті яких відбувається поступова побудова теорії. Більше того, на вищих

етапах цього процесу деякі попередні етапи розглядаються як допоміжні, а тому на завершальній стадії побудови теорії відкидаються. Вихідним пунктом побудови КЕД послужила максвеллівська теорія вільного електромагнітного поля. Потім ця теорія трактується таким чином, що поле розглядається як дискретна система з нескінченною кількістю ступенів вільності. Після цього проводиться процедура вторинного квантування, за допомогою якої поле зіставляється з квантами енергії (фотонами) і вводяться оператори народження і знищення частинок. Далі, спираючись на формалізм електромагнітного і електронно – позитронного квантових полів, будується теорія їх взаємодії. При цьому необхідно проводити процедуру перенормування. Така побудова теорії мало чим нагадує дедуктивні висновки [215].

При цьому для нас суттєво, що у побудовах сучасних фізичних теорій особливе місце відводиться “конструктам”, які визначають структуру теорії, характер і спосіб взаємодії: калібрувальна симетрія, спонтанне порушення симетрії, фізичний вакуум і т. д. Дослідження показують, що глибоке коріння цих понять сягає фундаментальних закономірностей явищ макро – і мікросвіту, що дозволяє використовувати їх як універсальні засоби пізнання. Це принциповий для нас висновок, оскільки він дає підстави для розроблення методики, в якій цим конструктам (ФФП) відводиться місце, адекватне їх статусу в науковому пізнанні. Ми виходимо з припущення, що синтезуючими і генералізуючими узагальненнями шкільного курсу електродинаміки у профільних класах можуть виступати ФФП, як логічна основа структури і змісту шкільного курсу фізики.

Термін “фундаментальний” широко використовується у фізичній, методологічній, методичній літературі та дисертаційних дослідженнях. А.Ейнштейн писав, що фізик-теоретик “в якості фундаменту має потребу в деяких загальних припущеннях, так званих принципах, виходячи з яких, він може вивести наслідки. Його діяльність, таким чином, розбивається на два етапи. По – перше, йому необхідно відшукати ці принципи, по – друге, розвивати наслідки, які випливають із цих принципів” [240, с. 14].

У дослідженнях радянських методологів перехід від однієї фундаментальної теорії (“дисципліни, яка не виводить свої основні закони і поняття ні з якої іншої науки” [4, с. 54]) до іншої визначав механізм розвитку науки, при цьому визначальними були соціальні фактори [5]. Зміни у розумінні механізмів розвитку науки відбулися, коли її аналіз почав здійснюватися за великими цілісними структурно – понятійними утвореннями [4; 169; 221].

Фундаментальне поняття (від лат. *fundamentum* – основа) – категорія науки, доведена експериментально і теоретично, на основі якої розвиваються нові напрямки в науці.

До фундаментальних фізичних понять відносимо поняття, що:

1) відображають фундаментальні властивості природи і одночасно є універсальними засобами пізнання (симетрія, невизначеність, відносність, ймовірність);

2) несуть інформацію про основоположні властивості матерії (поле, фотон, фізичний вакуум, фундаментальні взаємодії, фундаментальні частинки, фундаментальні константи);

3) належать до природничо-наукових категорій (енергія, імпульс, момент імпульсу, маса, заряд).

В §1.1.4 ми обґрунтовуємо процедуру відбору необхідної з точки зору фізики, як науки, та фізики, як навчального предмету, системи ФФП. При цьому ФП розглядаються не тільки як структурні елементи фізичних теорій, а ширше – як конструкти, стержневі ідеї, в яких найбільш повно відображається специфіка процесу пізнання. Той факт, що ФФП є системою понять і формуються протягом тривалого часу, сприяє відносній завершеності навчання на кожній його ступені.

Це дозволяє зблизити навчання з науковим пізнанням і в деякій мірі зняти протиріччя між ними, яке полягає у невідповідності між рівнем засвоєння мови науки як цілого, адекватного всій системі знань і поясненням частини, що обов’язково враховує ціле. Близькість ФФП до повсякденних уявлень [31, с. 157] може сприяти їх ефективному засвоєнню, забезпечувати усвідомлення, а

не інтуїтивне розуміння матеріалу.

Ми виходимо з того, що для з'ясування фізичного змісту ФФП, виявлення їх універсальних функцій у побудові шкільного курсу електродинаміки для профільних класів, необхідно дослідити становлення класичної електродинаміки та сучасних фізичних теорій (КЕД, КХД, КАД) за оригінальними роботами їх творців. Висвітлення цих теорій у навчальних посібниках дає випрямлений шлях їх розвитку і створює хибне уявлення про кумулятивний шлях розвитку науки, що, в свою чергу, веде до аналогічного трактування розвитку понять у методиці.

Кумулятивне розуміння розвитку фізики веде до неадекватного трактування співвідношення між новими і старими теоріями (нова теорія змінює всю “понятійну сітку”, через яку вчені досліджують природу [121]), яке проявляється у спрощеному розумінні принципу відповідності [170; 197; 215]. Цей принцип насправді має формально – математичний характер. В методиці кумулятивне розуміння співвідношення між теоріями визначає існуючу структуру курсу фізики: спочатку формуються поняття класичних теорій, а потім їх намагаються “розвинути” до понять сучасних фізичних теорій.

Спробою кардинального розв'язання протиріччя між теоріями є підхід, запропонований на перспективу О.С.Руденком, який пропонує, що внаслідок логічної несумісності нової і старої фізичної теорії, остання має бути перебудована у відповідності з новими уявленнями з метою органічного включення в нову теорію [180]. Проте спроби реалізувати таке завдання ведуть до принципових труднощів як фізичного [187], так і психологічного [80] характеру.

Наші дослідження показують, що інтегруючу функцію “з'єднувального містка” теорій можуть відігравати ФФП, природі яких ці функції потенційно притаманні. Нами запропонована методика реалізації таких можливостей при формуванні ФФП в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення курсу електродинаміки.

1.1.2. Місце ФФП у шкільному курсі фізики.

Кумулятивне розуміння логіки розвитку фізики, яке формують деякі посібники, їх “проекція” на шкільні підручники веде до цілого ряду наслідків:

1. Засвоєння фізичної теорії передбачає не тільки знання її структури, вміння отримувати наслідки і застосовувати їх при розв’язуванні задач, але й засвоєння певного способу мислення. Проведений нами лабораторний педагогічний експеримент свідчить, що навіть кращі учні, які володіють переліченими вище знаннями теорії (класичної електродинаміки) при виконанні спеціально підібраних завдань показують неадекватне розуміння суті фізичних явищ і процесів, а інтуїтивне розуміння не переходить в усвідомлене.

2. Відбір навчального матеріалу і його вивчення будують зараз відповідно до виділеної структури фізичної теорії (основа, ядро, висновки), а при формуванні мислення – до схеми циклу пізнання і методичного принципу циклічності. Такий підхід ґрунтується на аналізі класичних фізичних теорій, для яких характерний аксіоматичний метод побудови, та враховує, що між теоріями існують чисто формальні, синтаксичні відношення [141; 151]. Вивченню відношень, в яких поряд із змістом і значенням враховується можливість перевірки, застосування, узагальнення і розвитку теорій, не приділяється належної уваги. Дуже виразно це прослідковується у трактуванні принципу відповідності, який в найбільш загальному вигляді формулюють так: з появою нової теорії стара теорія не відкидається, а зберігає своє значення для попередньої області явищ як гранична форма і частковий випадок нової теорії [75; 170]. Але, як показано у [181; 224; 230], суттєвим для всякої заміни теорій є те, що нова теорія веде до зміни всієї “понятійної сітки”, всього концептуального апарату старої теорії.

Процес розкриття механізмів зміни змісту понять стикається з рядом серйозних труднощів. Дійсно, якщо врахувати, що в процесі наукової революції частина ФП просто відкидається (поняття “траєкторії” у квантовій механіці, “абсолютної одночасності” у релятивістській фізиці і т.д.), появляються нові ФП, а частина понять радикально змінює свій зміст, стає просто незрозуміло, як

можна говорити про послідовність і наступність фізичних теорій на концептуальному рівні.

Деколи висловлюється думка, що проблеми, зв'язані із зміною смислу, не настільки серйозні, щоб їх не можна було обійти. Вказують на перетинання областей референтності (застосовності) термінів теорій як на фактор наступності в понятійній сфері. Чи це так? Про це говорить, наприклад, перетинання областей референтності таких понять, як “маса” у СТВ і в класичній фізиці. Воно дозволяє встановити рівність (при граничному переході) числових значень релятивістської і класичної мас при швидкостях, малих у порівнянні зі швидкістю світла, і розбіжність цих значень при швидкостях, близьких до швидкості світла. Наявність спільного референта у понять дозволяє порівняти наслідки теорій і встановити суперечності між ними. Але вона не дозволяє стверджувати про існування між ними послідовності та наступності.

Отже, труднощі теоретичної реконструкції наступності та послідовності наукового знання, які зв'язані із зміною змісту понять не слід зменшувати. Проблема зміни змісту стосується головним чином первинних термінів, тобто тих, які застосовуються для опису найбільш загальних властивостей дійсності – простору, часу, причинності, довжини, станів і т.д.

Зміст вихідних понять теорії складається із двох частин – одна відповідає тому смислового змісту, яке поняття має до його включення в теорію, залишаючись в межах світоглядницьких передумов, друга відповідає тому більш точному змісту, який воно отримує вже в контексті теорії. Теоретична частина змісту поняття змінюється радикально, категоріальна частина змісту залишається відносно інваріантною.

Отже, у кожному понятті і в кожній конкретній теорії, крім емпіричного і навіть специфічно наукового, є зміст, який робить теорію належною до більш високих рівнів систематизації знання – філософії і світогляду. І саме це дає можливість зрозуміти, яким чином можлива кумуляція знання на рівні концептуального апарату теорій [210].

3. Часто в психолого-педагогічній літературі послідовності “сприйняття –

уявлення – поняття” надають функціонального змісту, тобто вважають, що кожне нове поняття виникає саме таким шляхом.

На практиці, як правило, розгортання навчального матеріалу слідує саме цій схемі. Цей шлях утворення понять викладений в багатьох працях з педагогічної психології і дидактики [62; 88; 90]. Результати дослідження цього питання коротко можуть бути виражені так: “Слово учителя в процесі навчання організовує спостереження учнів, уточнює об’єкт спостереження, спрямовує аналіз на те, щоб розрізнити суттєві сторони явищ від несуттєвих, і нарешті, слово – термін, асоціюючись з виділеними ознаками, спільними для багатьох явищ ,стає їх узагальненням – поняттям” [61]. Рух від сприйняття до поняття – це перехід від конкретного, чуттєвого до абстрактного, мисленого. Понятійне узагальнення, одержане в такий спосіб, має давати чіткі і однозначні розпізнавальні ознаки стосовно конкретних предметів чи явищ.

Поняття повинні бути сформовані в учнів так, щоб повноцінно виконувати цю функцію. Проте результати проведеного нами констатуючого експерименту свідчать, що узагальнення, одержані учнями за схемою “знизу – вгору”, самі по собі часто не забезпечують рух від загального до конкретного, “зверху – вниз”.

При такому підході до формування понять перехід від загального до конкретного виступає як цілком самостійний процес. Основний засіб, що має заповнити розрив між конкретним і абстрактним, прихильники цього напрямку [61; 89; 93; 151] бачать у збагаченні чуттєвого досвіду учня. Чим абстрактніше первинне узагальнення, тим більше конкретизації вимагає його повноцінне засвоєння. Сама конкретизація здійснюється в процесі застосування поняття, при розв’язуванні задач. Широта і багатогранність відомостей про чуттєво – конкретні прояви загального служать показником рівня оволодіння поняттям.

Хоча в сьогоднішній методичній літературі з фізики постулюється необхідність формування науково – теоретичного мислення, а в шкільних підручниках [55; 59; 149; 150] матеріал групується навколо чотирьох фундаментальних теорій, проте на практиці вивчення конкретних понять в

основному використовується приведена вище схема їх формування. Ядром такої діяльності учнів є логічна індукція, а результатом навчання – формування емпіричного мислення.

В педагогічній літературі, розглядаючи “розвиток понять”, по суті, мають на увазі додавання нових ознак поняття до тих, які вже сформовані раніше [46; 124; 126; 213; 216]. В рамках однієї фізичної теорії такий підхід не викликає принципів заперечень (він відповідає кумулятивному накопиченню знань в рамках існуючої парадигми). Але спроба формувати в такий спосіб наскрізні поняття (енергія, поле, випромінювання, маса і т.д.) веде до труднощів принципового характеру. Адже в науці при зміні парадигми кардинально змінюється зміст як окремих понять, так і всієї понятійної сітки (бо інакше, зміна парадигми була би позбавлена сенсу) [121]. Визнання нової моделі розв’язання проблем змінює не інтерпретацію окремих фактів, а їх бачення. [154]. Аналіз змін, які відбуваються у змісті понять при переході від електродинаміки Максвелла до квантової електродинаміки, від класичної до квантової механіки, (при збереженні тієї ж назви понять) свідчить, що поступовий (плавний) розвиток понять за таких умов неможливий, оскільки появляються ознаки, які суперечать раніше засвоєним: дискретність зміни енергії системи, локалізація енергії випромінювання, взаємодія і т.д.

Відтворення у навчанні шляху, що мав місце при історичній зміні фізичних теорій виявляється теж малоефективним, оскільки тоді треба забезпечити умови неконструктивного переходу. Існування такої неконструктивності переходу добре видно із висловлювань вчених [62; 63], але психологія цього процесу ще не достатньо досліджена.

Вихід у якійсь мірі може полягати у засвоєнні учнями модельного підходу дослідження фізичних явищ [14; 16; 19; 129; 188]. Перехід від однієї моделі до іншої відбиває розвиток знань в рамках однієї теорії і деструктивний перехід до нової теорії. При цьому стара модель використовується до деякого кола явищ даного класу, на її основі виявляються принципові протиріччя, які служать основою конструювання повнішої моделі.

Усвідомлення визначального місця ФФП не досягається декларативним визнанням за ними місця, адекватного їх статусу в науці – як інтегруючих, інваріантних засобів пізнання для різних фізичних теорій (див. §1.1.4), чи демонструванням ефективності їх застосування до розв’язування конкретних фізичних задач. Необхідна робота, спрямована на вироблення навичок: а) аналізувати склад виучуваного матеріалу, виділяти його елементи (домінуючі і зв’язуючі), встановлювати логічні зв’язки між ними, функціональне призначення кожного нового елементу знань; б) запам’ятовувати навчальний матеріал; в) знаходити правила та методи системного засвоєння знань. Така робота сприяє формуванню ФФП в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення курсу електродинаміки, дозволяє підвищити його науковий рівень та якість знань учнів.

1.2. Аналіз методичних підходів вивчення електродинаміки

В історичному плані прослідковуються два взаємозв’язаних напрямки вдосконалення змісту шкільної фізичної освіти: 1) вивчення традиційного (класичного) навчального матеріалу на основі сучасних наукових уявлень; 2) включення (або підсилення) елементів сучасних фізичних теорій, на яких базується сучасна фізика.

Про розвиток останнього вказує аналіз вітчизняних і зарубіжних навчальних програм [68; 155; 158; 172; 173; 179; 200; 201]. Діючі програми з фізики для 10–11 класів будуються на основі концепції профільної диференціації та систематичності. Суть профільної диференціації полягає в тому, що різні за профілем класи вивчають курс фізики за програмами, які відрізняються не тільки глибиною викладу матеріалу, змістом та обсягом вправ, вимог до знань і умінь учнів, а й переліком розділів, тем і питань, що належать до програми даного курсу. Слід відмітити, що сучасний етап диференціації навчання фізики у школі є перехідним; профільна програма спирається в

основному на традиційний зміст та традиційну структуру шкільного курсу фізики, на нині діючі підручники. Цим зумовлені її експериментальний характер і в деякому відношенні певна обмеженість.

У програмах [172; 173] виділено три рівні профільних програм, у кожному з яких виділяються обов'язкові результати, які визначаються стандартом фізичної освіти, і вищі рівні; тобто рівнева диференціація пронизує профільну.

У розроблених національних програмах та стандартах освіти [200; 201] методи природничо – наукового пізнання виділяються в окрему змістовну лінію, вказується на необхідність поєднання основ класичних фундаментальних теорій і сучасних квантово – польових теорій.

В структурі сучасних фізичних уявлень про матеріальну дійсність важливе місце належить уявленням про симетрію. Роль принципів симетрії в науковому пізнанні розкривається у ряді праць [34; 35; 82; 202], у [171] наголошується на значних евристичних можливостях принципу симетрії. Проте праць, присвячених питанням формування уявлень про симетрію в навчанні фізики, дуже мало [81; 96] і формування таких уявлень ще не стало необхідним елементом фізичної освіти не тільки в школі, але й у вузі [24].

Серед них чотири дисертаційних дослідження [81; 96; 185; 225] присвячені формуванню уявлень про симетрію в курсі фізики середньої школи.

В дисертаційній роботі [185] досліджуються можливості формування уявлень про симетрію фізичних об'єктів і закономірностей деяких фізичних явищ і процесів на основі принципу симетрії П.Кюрі. Ряд питань шкільного курсу пропонується вивчати із застосуванням симетрії: механічна симетрія ІСВ, симетрія кристалів, зв'язок симетрії поля і симетрії електричних зарядів, симетрія зображень у плоскому і сферичному дзеркалах, симетрія частинок і античастинок. Дисертаційне дослідження [225] присвячене питанням відбору конкретного теоретичного матеріалу 9 – 11 класів, які можна вивчати на основі принципу симетрії та аналізу задач з різних розділів фізики, розв'язання яких раціоналізується на основі ідеї симетрії.

У докторській дисертації Б.Є.Будного [23] показано, що формування ФФП сприяє такій організації навчального матеріалу, при якій найбільш повно розкривається структура і логіка сучасної фізичної науки, статус понять і законів, формування наукового світогляду, розроблена методика формування системи ФФП (симетрія, невизначеність, відносність, фундаментальні частинки) на прикладі вивчення квантової фізики.

В ряді досліджень [58; 78; 147; 170; 184; 204] пропонується включити питання методології фізики в шкільний курс фізики як об'єкт вивчення. В [170] пропонується використати принцип відносності як інтегруючий інструмент пізнання при розв'язуванні задач і вивченні ряду теоретичних питань.

В дослідженнях Г.М.Голіна [54], А.А.Пінського [165] та [13] відстоюється думка, що вивченню СТВ у 11-у класі повинно передувати її пропедевтичне вивчення у 8 і 9 класах.

В дисертаційному дослідженні О.С. Руденка [180] показано недоліки математичного і традиційного (на основі механіки Ньютона) трактування теорії відносності та запропонована методика вивчення теорії відносності, що ґрунтується на наочному трактуванні релятивістських принципів.

Проблеми, що виникають при засвоєнні квантово – релятивістських понять, піднімалися вже в працях основоположників релятивістської і квантової теорії Н.Бора [8; 9], Луї де Бройля [12], Гейзенберга [48; 49; 50], А.Ейнштейна [237 – 242] та у роботах Я.Б.Зельдовича [103], П.Л.Капіци [94]. На проблему модернізації курсу фізики в середній школі вказується і в методичній літературі [14; 25; 42; 53; 58; 60; 104; 107; 129; 139; 145; 146; 155; 159; 176; 186; 190; 200; 201; 204; 233; 234; 235].

У [204; 233; 235] проаналізовано класичні питання фізики з точки зору коректності застосовуваної методики, запропоновано нетрадиційне їх викладення. Описано теорему Остроградського - Гаусса для розрахунку електричних полів, закон Ома для неоднорідної ділянки електричного кола, теорему про циркуляцію для розрахунку магнітних полів соленоїда та тороїда. Визначено питомий заряд електрона методом магнетрона.

У [236] розглянуто електричне поле у вакуумі, в діелектриках, провідники в електричному полі. Значну увагу приділено енергії електростатичного поля, постійному струму, електричному струму в електролітах та газах, електропровідності твердих тіл, квазістаціонарним струмам, магнітному полю, електромагнітному полю і хвилям. Висвітлено термоелектронну емісію та контактні явища в металах і напівпровідниках, електромагнітну індукцію. Описано магнітні властивості речовин.

Дисертація [135] присвячена теоретико-експериментальному обґрунтуванню сучасної методичної системи навчання фізики в основній школі. Посилено функції першого ступеня навчання шкільної фізики щодо формування цілісних уявлень про природничо-наукову картину світу та цілеспрямованого формування узагальнених способів діяльності.

У [103] обґрунтовано загальні засади методики вивчення властивостей твердих тіл, які ґрунтуються на атомістичному методі їх пояснення та застосуванні активних засобів навчання. Удосконалено методику вивчення будови та властивостей твердих тіл у курсі фізики старшої школи шляхом висвітлення внеску українських учених у розвиток фізики твердого тіла.

У [192] розроблено методичну систему, яка активізує пізнавальну діяльність учнів на уроках вивчення нового навчального матеріалу з електродинаміки з застосуванням комп'ютера. Розглянуто технічний та методичний аспекти застосування ЕОМ для вивчення нового навчального матеріалу з розділу "Електродинаміка" в ЗОШ.

У роботі [87] досліджено проблему підвищення ефективності та результативності процесу навчання фізики в класах фізико-математичного профілю. Розроблено методичні прийоми використання традиційних і створених дидактичних засобів для класів фізико-математичного профілю.

У [188] теоретично й експериментально обґрунтовано нову дидактичну систему формування творчих здібностей та стимулювання пізнавальної активності старшокласників на базі теорії управління навчанням фізики, створено інноваційні методичні моделі управління навчання фізики

старшокласників на рівнях активізації пізнання та розвитку творчих здібностей, розроблено навчальну програму "Вибрані питання шкільного курсу фізики."

У роботі [195] обґрунтовано дидактичні основи розробки та використання сучасних джерел випромінювання у навчальному фізичному експерименті для активізації пізнавально-пошукової діяльності учнів за умов профільного навчання фізики. Розглянуто дидактичну систему шкільного фізичного експерименту в поєднанні з комп'ютерною технікою, яка активізує пізнавально-пошукову та навчально-дослідницьку діяльність учнів і підвищує інтерес до пізнання оптичних явищ та взаємозв'язків.

Дисертацію [148] присвячено розробці і впровадженню системи навчальних комп'ютерних програм для вивчення квантової фізики в середній школі. Обґрунтовано доцільність формування основних понять квантової фізики з використанням можливостей комп'ютерної техніки.

У роботі [166] науково обґрунтовано методикку реалізації інтеграції елементів знань учнів з фізики та математики в сучасній загальноосвітній школі. Проаналізовано особливості інтеграційних процесів та їх роль у формуванні творчого мислення старшокласників.

У [199] розроблено методикку навчання молекулярної фізики у загальноосвітніх навчальних закладах на базі особистісно орієнтованої технології. Досліджено зміст і структуру розділу "Молекулярна фізика" за методами системного підходу та технологією структурно-логічного аналізу навчального матеріалу. Обґрунтовано його побудову на підставі логічного упорядкування змісту навколо фундаментальних і наскрізних понять, інтеграції знань профільних предметів та їх системного розгляду.

У роботі [143] розроблено методикку застосування нового навчально-методичного комплексу, який поєднує традиційний підручник з фізики з електронним додатком до нього.

У дисертаційному дослідженні [27] доведено, що генералізація навчального матеріалу з електромагнетизму в основній школі може

здійснюватись на підставі понять електромагнітної взаємодії й електромагнітного поля. Обґрунтовано доцільність побудови принципово нової методики навчання електромагнетизму в основній школі на базі генералізації змісту, структури та навчального матеріалу з даної теми на основі понять електромагнітної взаємодії й електромагнітного поля та з використанням елементів електронної теорії та явищного (феноменологічного) підходу. Вперше розроблено зміст, структуру та методику навчання електромагнетизму в основній школі відповідно до обраних напрямів генералізації. Удосконалено методику викладання окремих тем електромагнетизму, модифіковано демонстраційний експеримент. Підтверджено готовність учнів основної школи до поглибленого вивчення електромагнетизму за умов допрофільної диференціації навчання (на прикладі фізико-математичних класів).

У роботі [152] проаналізовано психолого-педагогічні аспекти навчання хвильових і квантових властивостей світла у середніх загальноосвітніх навчальних закладах за рівнем стандарту. Досліджено методику навчання хвильової та квантової оптики за умов інформатизації профільного навчання та впровадження нових інформаційних технологій у навчальний процес.

У [153] теоретично обґрунтовано доцільність використання оперативного та тематичного контролю під час навчання фізики на базі застосування еталонних вимог і визначено шляхи реалізації запропонованої методики.

У роботі [29] обґрунтовано теоретико-методичні засади застосування дидактичних засобів з фізики у класах природничого профілю. Установлено, що ефективність і результативність навчання фізики учнів підвищується, якщо використовуються спеціальні дидактичні засоби та реалізується компетентнісний підхід у процесі профільного навчання, який поєднує особистісно орієнтований і діяльнісний підходи.

У [168] на підставі аналізу психологічних особливостей учнів IX класів створено методику виявлення осіб, здібних до поглибленого вивчення фізики. Розроблено програму вивчення розділу "Механіка" у школах і класах з поглибленим вивченням фізики.

У роботі [188] обгрунтовано ідею цілеспрямованого та систематичного використання модельного експерименту у навчанні фізики як ефективного засобу формування наукових понять у школярів. Проаналізовано фактори, що зумовлюють необхідність застосування модельних дослідів як засобу формування фізичних понять. Виявлено дидактичні функції модельного експерименту, що використовується з метою формування наукових понять.

У [76] визначено й теоретично обгрунтовано педагогічні умови реалізації наступності фізико-математичної підготовки у ліцях та ВНЗ III - IV рівнів акредитації, запропоновано методика реалізації принципу наступності фізико-математичної підготовки в ліцях та ВНЗ III - IV рівнів акредитації.

У роботі [45] досліджено питання теоретико-методологічного обгрунтування та практичної реалізації створення сучасного навчального комплексу з оптики, який відображає останні наукові досягнення в цій галузі. Розроблено систему навчальних експериментів з оптики та методика використання їх у середніх навчальних закладах різних типів.

У [66] подана науково обгрунтована методика моделювання статистичних закономірностей в рамках комп'ютерного лабораторного практикуму. Описані програмно-методичні засоби, які доповнюють систему фізичного експерименту засобами комп'ютерного моделювання та дозволяють підвищити рівень і якість вивчення статистичних процесів.

У роботі [161] висвітлено стан проблеми підготовки майбутнього вчителя до профільного навчання фізики в теорії та практиці. Розроблено критерії змістово-предметної, методичної та психолого-педагогічної готовності й принципи підготовки вчителя до профільного навчання фізики.

У [69] обгрунтовано необхідність впровадження у практику середньої загальноосвітньої школи проблемно-модульної технології навчання. Розкрито її наукову сутність, принципи, складові умови її застосування. Вказано місце нових інформаційних технологій у проблемно-модульному навчанні.

У дисертації [26] досліджено проблему підвищення розвитку інтересу учнів основної школи до вивчення фізики шляхом використання інноваційних

педагогічних технологій, а саме: комплектів інформаційних, дидактичних і методичних матеріалів (портфоліо навчальних проєктів) з інформаційно-комунікаційних засобів навчання у позакласній роботі.

У роботі [227] розроблено модель процесу розвитку мислення учнів під час вивчення "Електродинаміки" за модульною технологією, яка передбачає використання системи фізичних задач розвивального характеру з метою активізації пізнавальної діяльності.

У дисертаційному дослідженні [142] розроблено навчально-методичний комплекс з метою формування понять з курсу фізики в учнів основної школи. Створено комп'ютерні моделі з урахуванням психолого-педагогічних й ергономічних вимог для залучення до сприймання інформації. Запропоновано методичні прийоми формування фізичних понять в учнів основної школи.

Необхідність повнішого і послідовнішого ознайомлення учнів з основами сучасної фізики визначається зараз багатьма вченими [104; 107; 130; 208; 235]. Але проблема формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення електродинаміки досліджена недостатньо. Суть змін, які ми пропонуємо, полягає не тільки у введенні нових понять і вдосконаленні структури розділу "Електродинаміка", але і в новому підході до вивчення питань класичної електродинаміки, який би забезпечував послідовний розвиток фізичних понять, які в квантовій фізиці одержують логічне узагальнення. Фізичні поняття і принципи (симетрії, відносності, невизначеності, ймовірності), глибинна суть і фундаментальність яких стали зрозумілими тільки в сучасних фізичних теоріях, мають стати для учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів інваріантними засобами пізнання явищ довільної природи.

1.3. Аналіз психолого – педагогічних та дидактичних підходів формування фундаментальних фізичних понять

1.3.1. Психолого – педагогічні основи формування понять.

Розв'язання проблеми формування ФФП неможливе без опори на психологічні дослідження витоків наукового пізнання, механізмів виникнення і розвитку в суб'єкта нового знання (поняття, образ, розумова дія), інтелектуального розвитку в цілому. Особливо актуальним є відшукування розвитку таких мислительних інструментів пізнання, оволодіння якими і їх розвиток визначатимуть шляхи формування наукового способу мислення.

В процесі навчання і розвитку людина засвоює поняття, які сформовані людством. Це засвоєння відбувається внаслідок мислительної діяльності, тобто для кожного індивідуума воно має характер формування. Наукові поняття формуються в учнів завдяки їх навчальній діяльності. Як вища форма відображення найбільш загальних, суттєвих сторін дійсності, поняття репрезентують найважливіший елемент знань про оточуючий світ. Все це дає підстави для висновку, що формування понять є одним з найбільш вагомих завдань, яке розв'язується в процесі навчання.

Єдиної концепції засвоєння понять в психології немає. Тому варто проаналізувати найважливіші з них з тією метою, щоб потім визначити психологічну основу методичного розв'язання проблеми формування фундаментальних наукових понять і їх систем в предметному навчанні фізики.

В генетичній психології [164] зроблена спроба пояснити наукове пізнання на основі його історії, соціогенезу і психологічних витоків тих понять і операцій, на які воно спирається.

Розвиток пізнання, вважає Ж.Піаже, веде до того, що знання суб'єкта про об'єкт стає все більш інваріантним. На цьому шляху [164, с 58-63] приходиться до думки про можливість використання теорії інваріантів (теорії груп) до вивчення процесів пізнання. Пізнавальні структури, які формуються на різних стадіях розвитку інтелекту, Ж.Піаже математично зображує в виді різних

структур (алгебраїчних груп і групувань), структур порядку, топологічних структур.

Аналіз пізнання як взаємодії суб'єкта і об'єкта, ріст інваріантності знань суб'єкта про об'єкт – все це приводить Ж.Піаже до формулювання найважливішої його тези: "...Фізичні закони об'єктів відповідають правилам збереження (або ідентичності), транзитивності і комутативності і т.д. так само, як і діям додавання (і оберненого – роз'єднання або віднімання) і множення (і оберненої йому – логічної абстракції), інакше кажучи, найбільш загальним логічним структурам" [164, с. 48]. Отже, операційні структури логіки, а саме, групування, є зв'язуючою ланкою, яка забезпечує єдність об'єкта і суб'єкта.

Згідно з теорією Ж.Піаже, фізичні, математичні і інші сторони дійсності мають форму станів і перетворень. В пізнавальних функціях станам відповідають фігуративні аспекти (сприйняття, образи – представлення), а перетворенням – операторні аспекти. Не діючи на об'єкт і не перетворюючи його, суб'єкт не зможе зрозуміти його природу і залишається на рівні простих описів [164]. Аналіз експериментальних матеріалів, проведений Ж.Піаже, показує, що поняття мають значно більший зміст, ніж сприйняття. Цим самим виключається можливість вивести із перцептивних структур операторні структури або структури понять [164, с. 58-62].

Узагальнюючи відповідні дані, Піаже так відповідає на проблему співвідношення фігуративних і операторних аспектів: 1) образи сприйняття і представлення недостатні для формування понять – їм відповідає операторна активність, яка не зводиться до фігуративних даних; 2) фігуративність не розкриває перетворень як зміну станів, 3) сприйняття не розвиваються автономно – їх еволюція відбувається під визначаючим впливом операцій.

Отже, згідно з Ж.Піаже, в основі формування поняття лежать дії – перетворення об'єкта і відновлення цього перетворення. Інтериоризація предметних дій, набування ними системності і оборотності дають поняттю його логічний зміст і форму на рівні формального мислення. Не дивлячись на те, що поняття природним шляхом отримує із сприйняття необхідну інформацію, тим

не менше, це поняття не впливає із сприйняття шляхом простого абстрагування і узагальнення. Операторний аспект поняття утворюють структури сенсомоторні або ж структури дії взагалі [164, с. 63]. Експериментальні дані, отримані Ж.Піаже мають велике значення для критики і подолання емпіричної теорії узагальнення і утворення понять.

У генетичній психології вивчаючи зв'язок між думкою і реальністю, виходять з того, що об'єкт існує незалежно від суб'єкта. Але для того, щоб пізнати об'єкти, суб'єкт повинен здійснювати дії з ними, і, тому, трансформувати їх: переміщувати, зв'язувати, комбінувати, віддаляти і знову повертати. Джерело знання лежить не в об'єктах і не в суб'єктах, а у взаємодіях. Об'єктивність не дана дитині з самого початку і для її розуміння потрібна серія послідовних конструкцій, які до неї наближають.

Ідея конструкції — це одна з центральних ідей генетичної психології. Об'єктивне знання завжди підпорядковане структурам дії, які є результатом конструкції: вони не дані ні в об'єктах, оскільки залежать від дій, ні в суб'єкті, оскільки суб'єкт має навчитися координувати свої дії. Інтелект є однією з таких структур — структура мислительної діяльності. Характеризуючи суб'єкт діяльності, можна виділити його структурні і функціональні властивості.

Протягом всього онтогенетичного розвитку основні функції (адаптації, асиміляції, акомодатії) як динамічні процеси незмінні, спадково закріплені, не залежать від змісту і від досвіду. На відміну від функцій, структури формуються на протязі життя, залежать від змісту досвіду і якісно відмінні на різних стадіях розвитку [164, с. 63].

Інтелектуальний розвиток можна описати як послідовність групувань, що впливають одне з одного, всіх 16 видів групувань [164]. Внутрішньою характеристикою, функціональним механізмом розвитку є рівновага — стабільний стан відкритої системи. Тому розвиток трактують ще як еволюцію, яка скеровується потребою в рівновазі. Особливістю інтелектуальних структур, що досягнули рівноваги, є оборотність. Критерієм набуття оборотності є поява в учня розуміння принципу збереження кількості (речовини, енергії і т.д.).

Рівновага повністю досягається при становленні дедуктивного методу. На цьому рівні суб'єкт може правильно міркувати на основі гіпотези, яка не відповідає жодному попередньому чи навіть можливому сприйняттю. Завдяки цьому думка може домінувати над перцептивним сприйняттям і пояснювати реальні факти через дедуктивні побудови.

Тому для формування в учня справді наукового мислення, а не просто сукупності емпіричних знань, не досить провести фізичний експеримент і запам'ятати одержані результати. Тут необхідний особливий досвід – логіко – математичний, спрямований на дії і операції, які здійснює учень з реальними предметами.

Так поступово складається той інтелектуальний інструментарій, який забезпечує формування операційного логічного мислення. Суттєво, що складовими цього інструментарію на рівні “розумової хімії” виступають симетрія, збереження, ймовірність, релятивність. Конкретна методика вивчення всіх навчальних предметів, а фізики особливо, має враховувати виявлене специфічне місце цих категорій у формуванні мислення учнів.

Отже, фактор рівноваги виступає внутрішнім регулятором розвитку інтелекту. Процес розвитку інтелекту, згідно [164], включає три великі періоди (стадії), протягом яких зароджуються і стабілізуються три основні структури. Спочатку формуються сенсомоторні структури, тобто системи обернених дій, які виконуються матеріально і послідовно, потім виникають і досягають відповідного рівня структури конкретних операцій – це системи дій, що виконуються в пам'яті, але з опорою на зовнішні, наочні дані. Після цього стає можливим формування формальних операцій. Це період становлення формальної логіки, гіпотетико – дедуктивних міркувань.

Розвиток можна трактувати як перехід від нижчої стадії до вищої. Попередня стадія завжди готує наступну. В процесі розвитку проходить не просте заміщення нижчих стадій вищими, а відбувається інтеграція раніше сформованих структур; попередня стадія перебудовується на більш високому рівні. Функціональний механізм розвитку можна охарактеризувати моделлю

взаємодії і єдності асиміляції – акомодатції [164].

Дослідження Л.С.Виготського [43; 44], якщо намагатися схематично розкрити його генетичні висновки, показує, що в загальному шлях розвитку понять складається із трьох основних ступенів:

- 1) утворення не оформленої і не впорядкованої множини
- 2) утворення комплексів;
- 3) розвиток розмежувань, аналізу, абстракції. “Тільки оволодіння процесом абстрагування разом з розвитком комплексного мислення здатно привести дитину до утворення істинних понять.” [43, с. 174]

“Поняття виникають тоді, коли абстраговані ознаки знову синтезуються і отриманий абстрактний синтез стає основною формою мислення, ” – підкреслює Л.С.Виготський [43, с. 174]. І далі: “Найважливішим генетичним висновком всього нашого дослідження є основне положення, яке говорить, що дитина приходить до мислення в поняттях, що вона завершує третю ступінь розвитку свого інтелекту тільки в перехідному віці.” [43, с. 175] Суттєво, що “... вищі форми комплексного мислення у вигляді псевдопонять є такою перехідною формою, на якій затримується і наше життєве мислення, що опирається на звичайну мову”. [43, с. 193] Дані педагогічного експерименту показують, що такими псевдопоняттями в багатьох випадках є: “електро-магнітне випромінювання” (35%), “енергія” (63%), “відносність” (58%).

При утворенні понять і псевдопонять результуюче узагальнення виникає різними шляхами (різні інтелектуальні операції), воно набуває різної форми (злитість з реальними предметами в комплексі і абстрагованість в понятті), але відображає в принципі один і той самий зміст. Це шлях від конкретного до абстрактного. Маючи таке поняття, дитина усвідомлює представлений в ньому предмет, але не усвідомлює “самого поняття, свого власного акту мислення, за допомогою якого вона уявляє даний предмет” [43, с. 79].

Шлях утворення наукового поняття протилежний, він починається з роботи над самим поняттям як таким, з словесного визначення, з таких операцій, які передбачають усвідомлене застосування цих понять [70; 71]. З

перших кроків навчання встановлюються логічні відношення між поняттями і тільки на цій основі переходять до об'єкта. Здійснюється перехід від поняття до речі – від абстрактного до конкретного. Зрозуміло, що цей шлях можливий тільки при спеціально організованому засвоєнні наукових знань.

С.Л.Рубінштейн, аналізуючи природу мислення, відмічає, що мислення здійснюється в узагальненнях. Воно завжди йде від одиничного до загального і від загального до одиничного. Мислення – це опосередковане – основане на розкритті зв'язків, відношень, опосередкувань – і узагальнене пізнання об'єктивної реальності, і підкреслює, що специфічним змістом мислення є поняття [47, с. 361]. Поняття — це опосередковане і узагальнене знання про предмет, яке базується на розкритті його істотних об'єктивних зв'язків і відношень.

Але відкриваючи зв'язки і відношення, виходячи від явища до узагальненого пізнання його суті, поняття набуває абстрактного характеру. Зміст поняття не можна собі наглядно уявити, але його можна усвідомлювати або знати. С.Л.Рубінштейн підкреслює, що мислення здійснюється в більш або менш узагальнених, абстрактних поняттях, і у мислення включаються більш або менш наглядні чуттєві образи; поняття і образ – представлення дані в ньому в нерозривній єдності. Людина не може думати тільки в поняттях без представлень в відриві від чуттєвої наочності; вона не може також думати одними лише чуттєво – наочними образами, без понять [47, с. 389].

З допомогою синтезу здійснюється обернений перехід від абстрактних понять до мисленого відновлення і пояснення спостережуваних явищ – до конкретних. Такий аналіз і синтез – дві основні операції науково – теоретичного мислення, метод якого полягає в сходженні від абстрактного до конкретного. На різних етапах пізнання єдність аналізу і синтезу набуває якісно різних форм, що, в свою чергу, зв'язане з різними шляхами узагальнень:

- елементарне емпіричне узагальнення;
- узагальнення через аналіз і абстракцію, – в науковому понятті відображається загальне, яке виступає як продукт аналізу і абстракції;

– процес виведення або дедукції [47, с. 383].

Для С.Л. Рубінштейна мислення внутрішнього зв'язане з узагальненнями – воно здійснюється в них і веде до узагальнень більш високого порядку. Стосовно понять це означає наступне: для загальності справжнього поняття необхідно, щоб воно брало загальне в єдності з особливим і одиничним і відкривало в ньому істотне [47]. Загальне представлення, утворене з допомогою виділення загальних рис, є лише зовнішньою сукупністю ознак, справжнє ж поняття бере їх у взаємозв'язку і переходах [33].

Специфіка учбової діяльності, згідно В.В. Давидова [70; 71] полягає в засвоєнні школярами відповідних теоретичних понять. Ця форма діяльності дозволяє дітям вивчати не безпосередньо дану природу, а ті способи відношень і орієнтації в ній, які склалися і закріпилися в людській практиці, і в таких її ідеальних утвореннях, як теоретичні поняття.

Введення того чи іншого поняття в навчальній діяльності спирається на побудову у школярів відповідної змістовної абстракції. Побудова цієї абстракції вимагає від дитини виконання специфічної дії, яка відкриває предметно – матеріальні умови походження даного відношення [70, с. 373].

В роботах В.В. Давидова [70; 71] і його школи досліджується природа зв'язку мислительної діяльності учнів із змістом засвоєваних знань. Навчальний предмет розглядається як своєрідна проекція наукового знання на площину засвоєння. Стержнем навчального предмету є програма, яка проектує той тип мислення, який формується у школярів при засвоєнні ними навчального матеріалу. Тому конструювання навчальних програм передбачає не тільки відбір змісту відповідної науки, але розуміння структури науки як особливої форми відображення дійсності, врахування психологічної природи зв'язку мислительної діяльності учнів із змістом знань, які засвоюються, володіння способом формування цієї діяльності. В.В. Давидов доводить, що справжнє розв'язання проблеми шкільної освіти з боку її логіко – психологічних основ передбачає зміну типу мислення, що проектується змістом навчальних предметів і методами їх вивчення, а саме - формування в учнів

науково – теоретичного мислення [70, с. 316].

Змістовне абстрагування і узагальнення, за В.В. Давидовим [70, с. 316-318], виступають як два єдиних аспекти сходження думки до конкретного. Абстракція і узагальнення лежать в основі утворення наукового, теоретичного поняття. В.В. Давидов робить висновок про те, що абстракція, узагальнення і поняття, які забезпечують теоретичне мислення, за своїм змістом і формою інші, ніж в емпіричному мисленні.

Ще один напрямок розв'язання проблеми формування понять розвинутий А.Н. Леонтьєвим, П.Я. Гальперіним, Н.Ф. Талізінною і їх послідовниками на основі теорії розумової діяльності [47; 125; 205].

В [125, с. 65-66] підкреслюється, що при засвоєнні того чи іншого знання в якості вихідних повинні братися не емпіричні ознаки матеріалу, а його кінцеві одиниці, тобто сучасний рівень наукових знань. Суттєвим тут є положення про те, що кінцеві одиниці матеріалу виділяються генетичним способом. Орієнтація на ці основні одиниці, на закони їх об'єднання, і головне, на методи їх визначення, характеризують III-й тип орієнтації, який, згідно П.Я. Гальперіна, зв'язаний з переходом дитини до опосередкованого, теоретичного мислення.

Дослідження [47; 125; 205] відкрили внутрішній зв'язок визначеного типу орієнтації із способами побудови навчальних предметів. При традиційній їх побудові часткові явища вивчаються раніше загальних правил (індуктивний принцип). Формування дій, які моделюють основні одиниці матеріалу, дозволяє розкрити учням загальні правила в самому процесі їх відновлення, тобто дозволяє подолати індуктивність. В свою чергу, це вимагає змін існуючих способів викладання навчального матеріалу, а викладання саме за III-ім типом орієнтації найбільше наближається до наукового, сучасного його розуміння.

Отже, реалізація III-го типу орієнтації і учіння, описана П.Я. Гальперіним, внутрішньо зв'язана з формуванням у учнів абстракцій і узагальнень змістовного типу, з засвоєнням ними теоретичних понять [125, с. 67-68].

А.Н. Леонтьєв відмічає нездатність асоціативної психології в її спробах зобразити утворення узагальнення за класичною схемою формальної логіки

[125]. Насправді за узагальненням лежить особлива діяльність, з допомогою якої здійснюється перехід, рух думки від одного змісту до іншого. Лише в переході одного поняття в інші вони разом і можуть відтворювати дійсність. Кожне поняття, як психологічне утворення є продукт діяльності. Не тому виникає у дитини понятійна діяльність, що вона опановує поняття, але – навпаки, вона опановує поняття, тому що навчається діяти понятійно, тому що сама її практика стає понятійною [125, с.68].

Н.Ф. Тализіна відмічає [205, с 218], що поняття повинні формуватися не в об'ємі лише означення, а відображати ту систему існуючих властивостей, які використовуються при доведенні. Учні повинні вміти диференціювати властивості необхідні і одночасно достатні. По-третє, учні повинні розуміти еквівалентність деяких систем необхідних і достатніх ознак. По-четверте, поняття повинні володіти властивостями системності, тобто знаходитися одне з одним в визначених відношеннях.

Розуміння структури діяльності і взаємоперетворюваності її складових частин використане нами при розробленні стратегії формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки. Проте, ми не розглядаємо теорію поетапного формування розумових дій як універсальний підхід формування довільних понять. Важко погодитися з тим, що поняття можна формувати, пропонуючи для засвоєння всі суттєві ознаки явища нараз. Такий підхід, реальний при формуванні простих понять, в застосуванні до понять складних (енергія, спіні, симетрія і т.д.) викликає ряд об'єктивних труднощів. Складні поняття, як показує експеримент, варто формувати поступово з опорою на повсякденні уявлення учнів. Це сприяє розвитку творчого мислення і можливості переносити його в нові ситуації.

Засвоєння змісту конкретного матеріалу повинно здійснюватися учнями через самостійну навчальну діяльність, яка в скороченому “квазі–дослідницькому” виді відтворює ситуації і предметно – матеріальні умови походження понять.

1.3.2. Дидактичні основи формування фундаментальних фізичних понять.

У відповідності з найбільш розповсюдженою думкою [77; 126; 175; 196], мислення – це внутрішнє оперування інформацією, її відбір і опрацювання, завдяки якому приходять до опосередкованого і узагальненого пізнання дійсності. Але до цього означення, на нашу думку, необхідно додати ще два, які розкривають процес мислення з іншого боку. У відповідності з першим, мислення – це інтерналізована дія по створенню і відбору інформації, яка відбувається в проблемних ситуаціях [84; 92; 98]. Згідно другого: мислення – ланцюг розумових операцій, з допомогою яких ми переробляємо інформацію, закодовану в сприйняттях, представленнях і поняттях [84; 92; 98].

У дидактиці процес формування наукових понять у учнів має складний характер і ґрунтується на узагальненні і абстракції. У [77; 126; 175; 196] виділяють такі етапи в процесі формування наукових понять:

- співставлення учнями даного об'єкту або явища з іншими з метою виділення його серед цих інших;
- пошук аналогічних характеристик, їх узагальнення, виявлення загального для різних фізичних явищ;
- пошук характеристик, які відрізняють дані явища від інших, які розкривають важливі зв'язки між ними;
- формування поняття на основі характеристик даної категорії предметів;
- застосування учнями сформованого поняття в нових ситуаціях.

Спираючись на емпіричну теорію мислення, педагогічна психологія і дидактика стосовно формування понять притримується двох наслідків. По – перше, істинне джерело і основа формування уявлень і понять у школярів бачиться в самих природних речах і явищах. По – друге, повноцінність понять і навіть рівень розумового розвитку дітей ставиться в залежність від повноти і розгорнутості відомостей про природу.

Усталеним є розуміння пізнання як суб'єкт – об'єктного відношення

(пізнання – відображення реальної дійсності). Але і в марксистській філософії є думка, що свідомість не тільки відображає об'єктивний світ, а й творить його. Такою ж не протилежною, а доповняльною думкою була ідея “адекватного відображення”, зміст якої зводиться до поняття “конструювання”.

На необхідність використання при аналізі питань побудови наукової теорії поряд з категорією “відображення” категорії “конструювання” вказував і Г. Герц: “Кожна конкретна теорія, – писав він, – це єдність відображення і конструювання, єдність зображення пізнавальних зв'язків і творчості формування структур ідеальних об'єктів, сенс яких передусім вимагає перевірки” [51, с. 8]. Здебільшого в літературі підкреслюють, що конструювання плідне тоді, коли воно базується на об'єктивних законах світу, є практичною реалізацією можливостей буття [178].

Відмітимо ще один досить цікавий погляд щодо конструювання. Йдеться про погляди А. Леруа – Гурана [178], котрий вважає, що в основі операції конструювання лежить уявлення. Воно є фундаментальною властивістю інтелекту, тому А. Леруа – Гуран дійшов висновку, що операціональність загалом є фундаментальною властивістю людського мислення.

Зазначені міркування наведено, аби наголосити, що проблеми формування наукових понять не можуть успішно розв'язуватися лише на основі ідеї відображення, хоча і не заперечується при цьому її корисність у певних межах. Бачимо, що теоретичне знання оперує абстрактними поняттями – конструктами. Найбільш істотним для теоретичного об'єкта “є його конструювання як ідеального об'єкта” [187, с. 250]. Тому варто погодитися з тим, що конструктивна діяльність є водночас створенням об'єкта.

Сконструюємо дидактичну модель процесу формування понять, що ґрунтується на принципах інформаційного підходу і враховує відомі нині в психології і фізіології уявлення про перероблення інформації, що поступає в мозок людини. Метою побудови цієї моделі є з'ясування того, як рухається об'єкт (учень) при формуванні понять.

Інформаційний підхід дозволяє виразити всі без виключення сторони, всі

етапи наукового процесу (отримання, переробку, збереження, передачу, використання знань) на основі самого поняття інформації. Дослідження інформаційного “зрізу” дійсності є важливою умовою необхідної повноти і адекватності пізнання світу [84; 92; 98].

Продуктивність інформаційного підходу до діяльності мозку проявляється в тому, що він об’єднує спільною ідеєю інформаційні можливості живої природи і техніки, – евристичного моделювання, яке по суті є моделюванням роботи мозку на рівні інформаційних процесів:

- переважаюче значення в ньому мають інформаційні, а не енергетичні зв’язки всередині системи;
- відбувається виділення корисних сигналів від шуму;
- процеси носять імовірнісний, а не жорстко детермінований характер.

В тісному зв’язку з інформаційним підходом до мозку розвивається вчення про пам’ять як форму збереження інформації в нервовій системі. З поняттям інформації пов’язуються тепер три основних складових пам’яті: запам’ятовування, збереження і відновлення інформації.

Із інформаційного підходу до діяльності мозку слідує, що свідомість здатна:

- а) набувати ззовні інформацію і зберігати її як свою іманентну частину;
- б) навчатися на основі раніше отриманої інформації;
- в) логічно виробляти (творити) нову інформацію всередині себе;
- г) за своєю волею (“вільна воля”) дати розпорядження (“сигнал”) до тієї чи іншої матеріальної дії.

Сукупність інформації, що її здобуває людина в процесі пізнання, утворює модель, яку називають інформаційною моделлю. Об’єкти зовнішнього світу через органи чуття викликають подразнення рецепторів, які виробляють певні нервові імпульси. Комбінації подразнень обробляються в чуттєвій області нервової системи, причому тут мають місце два основних процеси: відбір інформації і її класифікація. Відібрана (тобто пропущена у вищі шари) інформація тут же зазнає раціональної класифікації за значенням (кажуть,

відбувається утворення інваріантів). Далі інформація переходить вже в область свідомості [33, с. 100-125].

Мозок людини володіє системою вроджених рефлексів, яка реалізує необхідні функції організму. Але попри звичайно розглядувані безсвідомі рефлекси [164], до рангу цих (вроджених) рефлексів можна віднести і рефлекс пошуку зв'язків між елементами інформації, який виражає одну з важливих функцій мозку.

Розвиток людини, зв'язаний з постійно поступаючою по різних чуттєвих каналах інформацією, веде до утворення інформаційних моделей. Ці моделі безперервно вдосконалюються завдяки новій інформації і логічній діяльності мозку. Вдосконалення моделей відбувається внаслідок таких процесів:

а) відібрана і класифікована за значенням інформація порівнюється з відповідною моделлю, що зберігається в пам'яті та доповнюється новими рисами;

б) доповнена модель співвідноситься з іншими моделями того самого класу. В результаті цього встановлюються нові зв'язки;

в) досконаліша інформаційна модель співвідноситься з реальним об'єктом та перевіряється її відповідність реальному об'єкту. У тому випадку, коли порівняння через канал зворотного зв'язку вказує на елементи невідповідності з реальним об'єктом, мозок дістає додаткову інформацію і перетворює модель до того часу, поки така відповідність не настає;

г) але можливий ще один процес, який також веде до вдосконалення моделі. Цей процес здійснюється без надходження ззовні нової інформації, без безпосереднього сприймання, а тільки за рахунок притаманної мозку функції пошуку зв'язків, між моделями одного класу, що зберігаються в пам'яті. Внаслідок такої діяльності свідомості, взаємозв'язані моделі все більше вдосконалюються не за рахунок сприйняття, а за рахунок пошуку нових зв'язків. Цей процес є найбільш високою формою пізнання об'єкта, бо веде до абстрагування і узагальнення. Зрозуміло, що створена в такий спосіб загальна, абстрактна модель також співвідноситься з реальним світом і виправляється,

якщо виявляється невідповідність.

Перші два процеси (відбір і класифікацію) є операціями відбору інформації (вони відбуваються в сенсорній області), а решта (що відбуваються в області свідомості), – конструктивними операціями. Процес вдосконалення інформаційної моделі відбувається неперервно, операції не розділені в часі. Вдосконалення моделі полягає не тільки у виявленні нового факту, але і у встановленні зв'язку його з раніше відомими фактами. Діяльність свідомості на встановлення нових зв'язків означає порівняння моделі з реальним об'єктом, утворення асоціацій. Утворення тимчасових зв'язків – це і є розуміння [206].

Звичайно, в навчанні учню передається не тільки інформація про факти, але і інформація про зв'язки. Зв'язки, які формуються завдяки такій інформації, тільки полегшують діяльність свідомості учня по їх відшукуванню. Але особливо важливі для розуміння ті зв'язки, які встановлює в процесі мислення сам учень.

Специфічною рисою змістовної абстракції і узагальнення є те, що для їх здійснення не обов'язкова наочність в її традиційному розумінні. Вони оперують поняттями, які, взагалі кажучи, мають риси образів. Понятійні образи виникають на основі особливих дій, які створюють об'єм поняття не у вигляді певної сукупності елементів, а як дещо цілісне, нерозділене, як одне. Такі образи формуються людиною шляхом мисленого конструювання, не звертаючись безпосередньо до відповідних ознак конкретних речей [164; 206], тобто шляхом операцій з понятійним матеріалом, що існує у вигляді інформаційних моделей у свідомості людини.

Як показують проведені нами дослідження, розроблена дидактична модель формування ФФП, яка ґрунтується на інформаційній моделі пізнавального процесу та ідеї конструктивізації, дозволяє надати ФФП у шкільному курсі електродинаміки місце, адекватного їх місцю у науці – універсальних конструктів та засобів пізнання, сприяє більш глибокому і систематичному їх засвоєнню та дозволяє структурувати на базі ФФП шкільний курс фізики для профільних класів.

1.4. Методологічні аспекти формування фундаментальних фізичних понять

Питання про значення ФФП в сучасній науці, про їх місце і системі знання, яке розвивається, широке і має ряд аспектів. Для нас в методологічному відношенні істотною є проблема розкриття специфічної ролі цих понять в прогресуючій теоретизації наукового знання, в збільшенні значення цих конструктів як одиниць особливої мови наукової теорії.

Істотна особливість ФФП зв'язана з тим, що їх зміст носить інтегративний характер, він існує як результат діалектичного синтезу частковонаукових означень і в процесі спеціально наукового функціонування диференціюється на багатозначні конкретні означення. Це обумовлює складну, різнорівневу структуру змісту ФФП: в такій структурі елементи дуже високого абстрактно – логічного узагальнення зв'язані з елементами наглядно – образного відображення; абстрактно виділене загальне, поєднується з конкретно – особливим, яке виражає частково – предметну форму прояву цього загального. Для ФФП характерне поєднання в них специфічних елементів чуттєвої генералізації і абстрактно – логічного узагальнення [63; 64 с. 168].

Слід підкреслити, що самі ФФП тісно взаємозв'язані і існують лише в органічній єдності одне з одним як елементи системи. Зміст, логіко – гносеологічні і методологічні функції кожного ФП можуть бути зрозумілі достатньо повно тільки з врахуванням його зв'язків в цій системі.

Методологія релятивістської фізики по – новому поставила не тільки проблему формування окремих наукових понять; вона запропонувала новий розв'язок проблеми взаємозв'язку логічної структури теорії і її понятійного складу, акцентуючи увагу на органічній взаємообумовленості елементів теорії – ФФП, принципів і наслідків, виведених із них шляхом дедукції. Розкриваючи в багатьох роботах зміст теорії відносності, А. Ейнштейн підкреслює що, відштовхуючись від дослідних фактів, у науці намагаються розвинути систему понять, яка логічно опиралась би на невелику кількість основних припущень,

так званих аксіом. Таку систему понять і називають теорією [237; 240].

Так, в спеціальній теорії відносності [238; 239; 242], зміна довжини і тривалості в інерціально рухомих системах знаходить своє пояснення в тому, що вони зв'язані в деяку цілісність через інваріантний інтервал, який отримав свою визначеність тільки в теорії. Це новий для фізики погляд на проблему співвідношення структури теорії і функціонуючих в ній понять [63; 64 с. 170].

Зміна ФП, коли нова теорія народжується із старої фундаментальної теорії (або коли з'єднуються новий математичний формалізм і його емпірична інтерпретація, утворюючи нову фундаментальну теорію), означає не пристосування старих ФП до нового математичного апарату, не обмеження старих ФП визначеною сферою застосовності, а виникнення нових ФП (які якісно відрізняються від старих) і разом з ними побудова нової фізичної теорії.

З виникненням квантової механіки в фізиці появились нові поняття, невідомі класичним теоріям. Квантовою механікою було вироблено поряд з іншими поняттями також фундаментальне поняття ймовірності. Статистичні закономірності квантовою механікою вводяться в основні закони атомних явищ; вони органічно з'єднуються з динамічними закономірностями [197; 202; 204; 240]. В квантовій механіці фізичні поняття “пристосовані” до її математичного формалізму. В цій теорії є основний постулат: кожній фізичній величині (динамічній змінній) класичної механіки відповідає в квантовій механіці визначений лінійний оператор, що діє на хвильову функцію. Між лінійними операторами існують ті ж співвідношення, які мають місце в класичній механіці між відповідними величинами.

Класичні поняття (наприклад, поняття рухомої частинки), які виявилися неточними в застосуванні до явищ атомного масштабу, були радикально перетворені і визначились як поняття, які відносяться до системи понять і принципів квантової механіки, яка відрізняється від системи понять і принципів, які лежать в основі класичних теорій. Питання про зв'язок математичного формалізму квантової механіки із спостережуваними даними вирішила концепція доповняльності Н. Бора [9; 10].

Розвиток теорії атома і мікрочастинок означав ствердження у фізиці ідеї про єдину корпускулярно – хвильову природу речовини і поля [10]. І в цьому полягає найбільш істотна риса квантового формалізму – симетрія відображає корпускулярну і одночасно хвильову природу мікрооб’єктів. В квантових величинах з’єднуються взаємовиключаючі класичні параметри, утворюючи нове поняття, яке відрізняється якісно від корпускулярної і хвильової сторін. З цієї точки зору класичні поняття не виключаються із системи понять квантової теорії, а зберігаються в ній, але вони фігурують не такими, як в системі понять класичної фізики, а в якості елемента квантового поняття, що утворилося. Квантові величини генетично зв’язані з класичними величинами, але не зводяться до них. Математично це виражається в тому, що в рівняннях квантової механіки фігурують символи, які означають не звичайні математичні величини, а більш абстрактні математичні утворення (диференціальні оператори і матриці), для яких не справджується комутативний закон множення. Властивості цих утворень виражають в математичній формі властивості квантових величин.

Комулятивне розуміння розвитку фізики веде до неадекватного трактування співвідношення між новими і старими теоріями, яке проявляється в спрощеному розумінні принципу відповідності: з появою нової теорії стара теорія не відкидається, а зберігає своє значення для попередньої області явищ як гранична форма і частковий випадок нової теорії [48; 49]. Але цей принцип має насправді формально – математичний характер [50; 63; 64], тому що суттєвим для всякої заміни теорій є те, що нова теорія веде до зміни всієї “понятійної сітки”, через яку вчені досліджують природу. Наші дослідження етапів становлення квантово-калібрувальної концепції поля [73; 75; 121; 163; 187; 204; 211; 218; 241] показують, що інтегруючу функцію “з’єднувального містка” теорій відіграють ФФП. Фундаментальні поняття виступають також основою інтерпретації і “раціоналізації” вже побудованих теорій.

Оскільки в навчанні ми маємо справу з матеріалом, відібраним в рамках усталеної парадигми, то роль конструктів мали б виконувати фундаментальні

закони. Для цього потрібно лише розробити раціональну методику їх вивчення, генералізувавши навколо них навчальний матеріал, та знайти спосіб узагальнення цих законів в рамках вибраних для навчання фізичних теорій. Останні в свою чергу інтегруватимуть знання в єдину природничо-наукову картину світу. Саме в такому напрямку методичні проблеми зараз розробляються [52; 147], запропоновано багато вдалих рішень [25; 27; 40; 58; 107; 128; 180; 204; 227; 235]. Але такий підхід не враховує суттєвих обставин: 1) реалізація потенційних можливостей загальних законів і теорій, яка копіює навчання у вузі, зустрічає ряд труднощів принципового характеру; 2) загальний закон стає інструментом пізнання, а не тільки вираження кореляції між явищами; 3) розвиток мислення неможливий без активізації функціонування тих пізнавальних структур, якими учень вже володіє.

Загально визнано, що навчальні предмети в сучасних умовах мають зазнати глибокої трансформації від навчального предмета, переповненого конкретною інформацією і такою, що конспективно переказує науку, має відбутися перехід до навчального предмета, з гранично узагальненим викладом основ науки [79; 129; 155]. Як вважається, такі основи відображені в чотирьох фундаментальних фізичних теоріях (класична механіка, електродинаміка з елементами СТВ, молекулярно-кінетична теорія і квантова фізика), навколо яких нині генералізується зміст і методика вивчення фізики в школі [58; 60]. Але практика і педагогічний експеримент показують, що поставлені програмою мета і завдання в такий спосіб не досягаються. Одна з причин такого стану, як показує наше дослідження, полягає в тому, що у виділених теоріях не функціонують конструкти, які б забезпечували зв'язок як між елементами змісту кожної конкретної теорії, так і між всіма теоріями. Як відомо, таку функцію в науці відіграють ФП. І ми виходимо із того, що вона об'єктивно може бути реалізована в навчальному процесі (зокрема, в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки).

Підхід, коли спочатку поняття пропонують формувати на емпіричному рівні, а потім (в старших класах) трансформувати їх до рівня теоретичного [88;

89; 90; 151] веде до принципових труднощів, бо вимагає зміни способу мислення, а отже, заміни всієї “понятійної сітки”. Але і загальноприйнятий підхід [70] до формування теоретичних узагальнень (через представлення всіх їх суттєвих ознак одночасно) для формування ФФП нездійснимий.

Тому ми пропонуємо формувати ФФП як теоретичні узагальнення при збереженні їх емпіричної основи – повсякденних уявлень.

У сучасній дидактиці фізики розрізняють чотири рівні сформованості фізичних понять у учнів [14; 204]: 1) дифузно-розсіяне уявлення про предмет чи явище; 2) учень, вказуючи ознаки понять, не відрізняє суттєві від несуттєвих; 3) учень засвоїв усі суттєві ознаки, але вони не систематизовані; 4) поняття узагальнене, засвоєні суттєві зв'язки даного поняття з іншими, учень вільно оперує поняттями.

В системі понять, що формуються в процесі вивчення природничих дисциплін, ми виділяємо такі поняття: 1) поняття, які не задаються визначенням («інтуїтивно зрозумілі») і засвоюються в ході розвитку і навчання дитини. Такими поняттями є, наприклад, поняття «часу», «простору», їх розширення і розвиток відбувається в процесі навчання; 2) поняття, що задаються зразу повним означенням. Процес засвоєння цих понять має більш чи менш тривалий характер, їх формування зв'язано з використанням життєвого досвіду і понять першого виду. Прикладами таких понять є «швидкість», «прискорення», «переміщення» і т.д. Поняття, що відносяться до названих двох видів, називають поняттями-елементами; 3) поняття, формування яких здійснюється шляхом використання понять-елементів. В результаті їх узагальнення утворюється загальне поняття. Такі поняття називають поняттями-комплексами. Прикладами понять-комплексів є поняття «механічне переміщення», «корпускулярно – хвильовий дуалізм» і т.д.; 4) фундаментальне поняття – виступає системним об'єктом і структурно є своєрідним конструктом, що не тільки несе інформацію про навколишній світ, але і забезпечує розуміння цієї інформації, вказує шлях руху до істини. Зміст фундаментального поняття суттєво визначає структуру моделі реальної дійсності (наукової картини світу).

Прикладами фундаментальних понять в фізиці служать поняття «симетрії», «відносності», «невизначеності», «ймовірності». Суттєво, що ФФП виступають основою пошуку, основою інтерпретації і “раціоналізації” вже побудованих теорій. Нами показано також існування таких взаємозв’язків на основі методологічного аналізу [111; 114; 117]. Вже це дає підстави для виділення мінімальної необхідної системи ФФП, сформованої за критерієм одержання кінцевого корисного результату – цілей навчання фізики.

Якби мета навчання фізики співпадала з ціллю фізичних досліджень, то включення цієї системи понять у навчальну систему було б очевидним. Але реально таке співпадання неможливе [121]. Тому виникає потреба конструювання навчальної системи ФФП. На основі виділеної з науки системи ФФП конструюється матриця навчальної системи ФФП. Вона включає такі поняття: симетрія, відносність, ймовірність, невизначеність, фундаментальні частинки, фізичний вакуум, фундаментальні взаємодії, поле, речовина. Матриця проектується на виділений в програмах зміст, виділяється лінія трансформації повсякденних уявлень, через поняття – елементи і поняття – комплекси до фундаментальних фізичних принципів для дослідження широкого кола явищ різної природи (зверху вниз) [24, с. 95]. Систему ФФП і зв’язків з їх структурними елементами, на основі вище сказаного, можна зобразити у вигляді орієнтованого графа з впорядкуванням його вершин типу матриці (рис. 1.4.1.). Де вершини m_j – ФФП, а вершини n_{jq} – структурні елементи основних понять. ФФП, функціональні і логічні зв’язки між ними є макроскопічним, інваріантом моделі фізики, а схема зв’язків і логічних відношень між структурними елементами ФФП – мікроструктурний інваріант

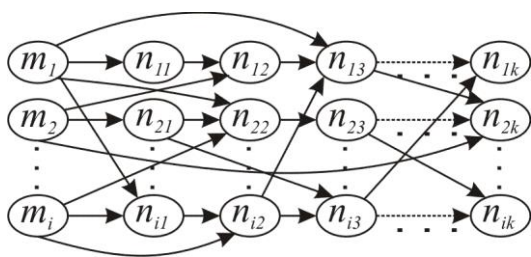


Рис. 1.4.1.

моделі (рис. 1.4.1.). В такому представленні графа добре видно зв’язки і логіку вивчення ФФП (m_j елементи – рух по стовбці), а також їх зв’язки із структурними елементами. В процесі поетапного розкриття структурної моделі науки, ФФП, «обрастають» від етапу

до етапу все новими і новими структурними елементами, функціонально – структурними зв'язками і логічними відношеннями між ними, в кінцевому випадку формується у певну цілісність, що системно відображає зміст окремих розділів. Матриця ФФП, а також інваріантні зв'язки і відношення між її елементами в сукупності утворюють структуру навчальної системи знань з фізики. На наш погляд вона є визначальною для всіх інших структур (теорії, закони, явища, поняття) і взаємозв'язана з ними. Відбір змісту фундаментальних понять здійснюємо за такими етапами [24, с. 91-93]:

1) Аналізуючи науковий матеріал, визначаємо зміст фундаментального поняття в сучасній природничій науці. Результат аналізу виражаємо у схемі понятійного апарату, побудованій так, що основною лінією схеми вибирається лінія структури об'єкта, елементи якої розгортаються шляхом введення понять – явищ, понять – властивостей, понять – величин і т.д..

2) Із схеми понятійного апарату фундаментального поняття в природничих науках у відповідності до предмету дослідження, виділяємо схему понятійного апарату, що описує фундаментальне поняття в фізиці.

3) Виділяємо із схеми понятійного апарату фундаментального поняття в фізиці той зміст поняття, який має бути засвоєний учнями в школі (фіксований «верхній» рівень змісту поняття в школі). Для цього вибираємо критерії виділення, узгоджені з вимогами програми (для профільних класів) і метою навчання. Такими критеріями, поряд із загальновідомими дидактичними принципами, є критерій значимості, критерій доступності, критерій міжпредметних зв'язків.

4) В одержаній схемі понятійного апарату виділяємо етапи і встановлюємо фіксований рівень для кожного етапу, узгоджений з вимогами програми (для профільних класів).

5) На основі схеми понятійного апарату визначаємо послідовність формування поняття шляхом встановлення зв'язків між елементами схеми.

6) Знаходимо лінії міжпредметних зв'язків і шляхи їх реалізації.

Так відбувається відбір змісту фундаментальних понять. Далі, в процесі навчання здійснюється формування понять у відповідності до моделі процесу і аналіз успішності засвоєння за допомогою критеріїв успішності. Вся система відбору змісту фундаментальних понять і їх формування для шкільного курсу електродинаміки та динаміки розвитку ФФП при його вивченні представлена схемою (рис. 1.4.2). Вона є основою для формування ФФП і побудови структурно-логічних схем вивчення окремих тем і розділів курсу електродинаміки для профільних класів.

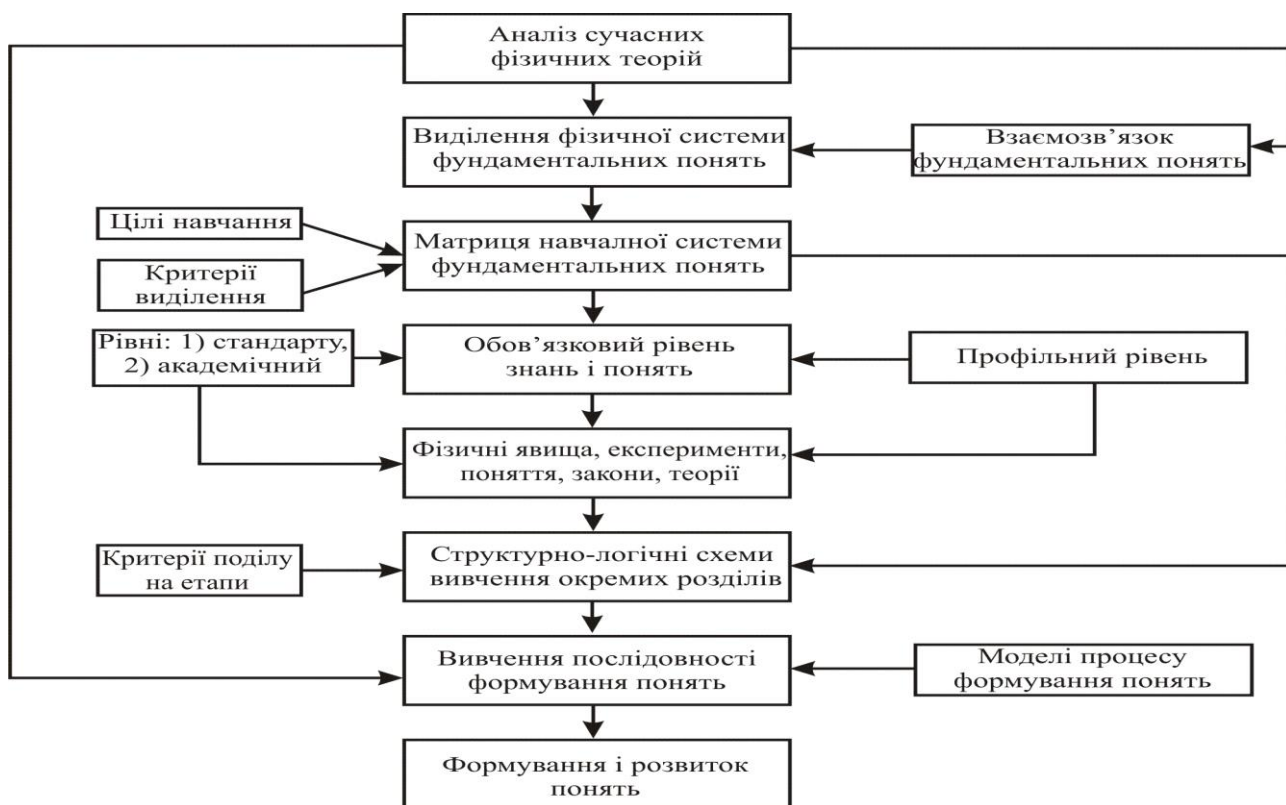


Рис1.4.2. Конструювання навчальної системи фундаментальних фізичних понять

Розглянемо тепер згадані вище критерії відбору змісту фундаментальних понять [24, с 108]: 1) Критерій загальної значимості – експертним способом визначалася значимість того чи іншого елемента схеми понятійного апарату в фізиці. 2) Критерій міжпредметних зв'язків: навчальне значення того чи іншого матеріалу залежить від необхідності включення його в навчальний матеріал не тільки виходячи із значущості для даного предмету, але і для інших предметів. 3) Критерій доступності визначається трьома факторами: розвитком наукового мислення учнів; математичною підготовкою учнів; шкільним експериментом.

Висновки до першого розділу

Аналіз літератури дозволив нам сформулювати **основні завдання дослідження:**

1) з'ясувати сучасний стан проблеми формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки, з'ясувати психолого – педагогічні та методичні аспекти їх формування, провести аналіз методології класичної та квантової електродинаміки, довести педагогічну доцільність формування фундаментальних фізичних понять у процесі вивчення електродинаміки;

2) вдосконалити методичну модель процесу формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів;

3) обґрунтувати і розробити методику формування системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітна взаємодія, електромагнітне поле, електромагнітна хвиля, фотон та ін.) в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка»;

4) розробити методику вивчення розділу «Електродинаміка» на основі системи фундаментальних фізичних понять для учнів профільних класів, обґрунтувати необхідність побудови розділу «Електродинаміка» для учнів профільних класів на основі методології сучасної фізики;

5) перевірити в ході педагогічного експерименту доступність, ефективність та результативність запропонованої методики формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка».

РОЗДІЛ II

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ПОНЯТЬ В УЧНІВ ПРОФІЛЬНИХ (ФІЗИЧНИХ, ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ І ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ) КЛАСІВ У ПРОЦЕСІ ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

2.1. Формування фундаментальних фізичних понять електричного заряду, електричного та електростатичного поля, потенціальності електростатичного поля, потоку електричного поля в учнів профільних класів

У програму з фізики для профільних класів [172, с.9] при вивченні електричного поля включено наступні питання:

Електричне поле. Напруженість електричного поля. Силві лінії електричного поля. Накладання електричних полів. *Принцип суперпозиції.* Електричне поле точкових зарядів. *Потік напруженості електричного поля.* *Теорема Остроградського-Гауса.* *Електричне поле заряджених поверхонь.*

Речовина в електричному полі. Провідники в електричному полі. Діелектрики в електричному полі. *Диполь.* Поляризація діелектриків. Діелектрична проникність речовини. *Електрети і сегнетоелектрики.* *П'єзоелектричний ефект.* **Вплив електричного поля на живі організми.**

Робота при переміщенні заряду в однорідному електростатичному полі.

Потенціал електричного поля. Різниця потенціалів. *Еквіпотенціальні поверхні.* Зв'язок напруженості електричного поля з різницею потенціалів. *Вимірювання елементарного електричного заряду.* *Дослід Йоффе-Міллікена.* *Потенціальна енергії взаємодії точкових зарядів.*

Електроємність. *Електроємність провідників різної форми.* **Конденсатори та їх використання в техніці.** Види конденсаторів. Електроємність плоского конденсатора. З'єднання конденсаторів. *Енергія зарядженого конденсатора.* **Енергія електричного поля.** *Густина енергії*

електричного поля.

Ми пропонуємо підхід, який дозволяє на основі формування фундаментальних фізичних понять (симетрія, відносність, поле, фізичний вакуум, фундаментальні взаємодії, електричний заряд) структурувати вивчення електричного поля згідно сучасних фізичних уявлень. Зупинимось на основних елементах пропонованого нами підходу:

1) Поняття електричного заряду. Закон Кулона та принцип суперпозиції полів.

Одним із фундаментальних понять електродинаміки є поняття електричного заряду. Дати словесне означення заряду, зводячи його до інших, вже відомих школярам понять не можна.

Так, у [222, с. 864] дається наступне означення: “Електричний заряд. Джерело електромагнітного поля, зв’язане з матеріальним носієм; внутрішня характеристика елементарної частинки, яка визначає її електромагнітну взаємодію. Вся сукупність електричних і магнітних явищ є прояв існування, руху і взаємодії електричних зарядів.

Розрізняють два види ЕЗ, умовно називають додатними і від’ємними; при цьому одноіменно заряджені тіла (частинки) відштовхуються, а різнойменно заряджені – притягуються”.

Із такого означення випливає, що про заряд судять по електромагнітній взаємодії тіл. Важливо підкреслити, що поняття заряду формується в кінцевому рахунку сумісно з поняттям електромагнітного поля в процесі вивчення електродинаміки та квантової фізики.

Розглянемо, які ж знання про електричний заряд потрібно сформувати у учнів в процесі вивчення електродинаміки [137, с. 28-38]:

1. Заряд і електромагнітна взаємодія.
2. Вимірювання заряду.
3. Дискретність заряду.
4. Рівність додатних і від’ємних елементарних зарядів.
5. Закон збереження електричного заряду.

Закон збереження заряду – один з фундаментальних законів природи, полягає в тому, що алгебраїчна сума (з урахуванням знаку) електричних зарядів будь-якої замкнутої (електрично ізольованої) системи залишається незмінною, які б процеси не відбувалися всередині цієї системи. Встановлений в 18 ст.

У кінці 19 ст. був відкритий електрон - носій негативного електричного заряду, а на початку 20 ст. - протон, що має такий же за величиною позитивний заряд; тобто, було доведено, що електричні заряди існують не самі по собі, а пов'язані з частками, є внутрішньою властивістю часток. Електричний заряд дискретний: заряд будь-якого тіла складає ціле кратне від заряду елементарного, рівного за величиною заряду електрона.

Оскільки кожна частка характеризується визначеним, властивим їй електричним зарядом, закон збереження заряду можна розглядати як наслідок збереження числа часток (у тих фізичних явищах, в яких не відбувається взаємоперетворень часток). При електризації макроскопічних тіл число заряджених часток не міняється, а відбувається лише їх перерозподіл в просторі. Так, якщо тіла заряджаються в результаті тертя (електризація тертям), заряджені частки переносяться з одного тіла на інше (заряд, який отримує одне тіло, втрачає інше); тобто, обидва тіла, спочатку електрично нейтральні, заряджаються рівними, але протилежними зарядами.

У фізиці елементарних часток (галузі фізики високих енергій), для якої характерні процеси взаємоперетворень часток, число часток не зберігається - одні зникають, інші народжуються, але при цьому закон збереження заряду завжди строго виконується і вимагає, щоб повний заряд залишався незмінним при усіх взаємодіях і перетвореннях часток. Народження нової зарядженої частки можливе лише або при одночасному зникненні "старої" частки з таким же зарядом, або в парі з іншою часткою що має заряд протилежного знаку (наприклад, в процесі народження пар частка-античастинка). При усіх таких перетвореннях повинні, зрозуміло, виконуватися і інші закони збереження, наприклад, енергії.

Закон збереження заряду разом із законом збереження енергії "пояснюють" стійкість електрона. Електрон (і протон) - найлегша із заряджених часток, тому він ні на що не може розпастися: розпад на важчі заряджені частки заборонений законом збереження енергії, а розпад на легші, ніж електрон, нейтральні частки заборонений законом збереження заряду. Про точність, з якою виконується закон збереження заряду, можна судити по тому, що (як показує експеримент), електрон не втрачає свого заряду принаймні за 10 років.

Слід відмітити, що в поняття "збереження заряду" включаються два твердження:

а) електрон і протон є матеріальними частинками з нескінченним часом життя. (В цьому аспекті закон збереження заряду є наслідком незнищуваності носіїв заряду як фізичних об'єктів і інваріантності заряду).

б) крім протонів і електронів існує велика кількість інших заряджених елементарних частинок. Всі вони породжуються, породжують інші частинки і знищуються в різних процесах взаємоперетворень. Експериментальні дані свідчать, що **при взаємоперетвореннях частинок їх сумарний заряд до взаємоперетворення дорівнює сумарному заряду частинок після взаємоперетворення**. Поряд із цим формулюванням даємо і інше, макроскопічне, яке базується на можливості вимірювання заряду: алгебраїчна сума зарядів в замкнутій системі тіл залишається незмінною в часі.

Учні повинні добре усвідомити той факт, що заряд зберігається при всіх рухах і взаємоперетвореннях носіїв заряду, але водночас він не є самостійною сутністю, незалежною від матерії, він – одна із властивостей матерії. Вся методична лінія при вивченні електростатики зводиться до того, щоб пояснення електростатичних явищ базувались на законі Кулона і принципі суперпозиції полів.

Зупинимось на деяких питаннях, зв'язаних з вивченням закону Кулона.

Як відомо, закон Кулона для сили F взаємодії двох точкових зарядів q_1 і q_2 , які знаходяться на відстані r , має вигляд:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1q_2}{r^2}, \quad (2.1.1)$$

де $\epsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) \text{ Ф/м}$. Він був встановлений Ш.О.Кулоном в 1785 р. безпосереднім вимірюванням сил взаємодії між зарядженими тілами, розміри яких набагато менші відстані між ними. Точність дослідів була невеликою, лише із загальних уявлень, які базувалися на аналогії з силами тяжіння, існувала впевненість в абсолютній правильності цього закону.

Учням підкреслюємо, що до робіт Фарадея, закон Кулона трактувався з позицій дальності (дія на відстані), тобто вважалось, що дія тіл одне на одного передається миттєво через порожнечу на скільки завгодно великі відстані. Відкриття електромагнітного поля показало, що концепція дальності невірна (60-80-і рр. 19 ст.). В першій половині XIX ст. виробилося інша точка зору на механізм взаємодії, згідно якої взаємодія між тілами здійснюється лише з допомогою неперервної “передачі сил” через простір між тілами. Ця концепція дістала назву **близькодії**. Близькодія - представлення, згідно з яким взаємодія між віддаленими одне від одного тілами здійснюється за допомогою проміжних ланок (чи середовища), які передають взаємодію від точки до точки з кінцевою швидкістю. Було доведено, що взаємодія електрично заряджених тіл здійснюється не миттєво і переміщення однієї зарядженої частки призводить до зміни сил, діючих на інші частки, не в той же момент, а лише через кінцевий час. У просторі між частками відбувається деякий процес, який поширюється з кінцевою швидкістю. Відповідно є "посередник", здійснюючий взаємодію між зарядженими частками. Цей посередник був названий електромагнітним полем. Кожна електрично заряджена частка створює електромагнітне поле, діюче на інші частки. Виникла нова концепція – концепція близькодії, яка потім була поширена і на будь-кого інші взаємодії. Згідно цієї концепції, взаємодія між тілами здійснюються за допомогою тих або інших полів, безперервно розподілених в просторі [137, с. 49].

Разом з ідеєю близькодії в науку ввійшло уявлення про поле як посередник, з допомогою якого здійснюється взаємодія. Спочатку функції

посередника приписувались середовищу, яке заповнює світовий простір – світовому ефіру. Стан ефіру характеризувався визначеними механічними властивостями (пружністю, натягами, рухом одних частин відносно інших). Спроба математичного формулювання цієї механічної картини передачі взаємодії була зроблена в 1861–1862 рр. Максвеллом [133; 194, с. 12-14], який намагався зобразити сили електромагнітної взаємодії в виді механічних сил, обумовлених натягами і тисками в ефірі. Пізніше він перейшов до феноменологічного формулювання взаємодії, характеризуючи стан середовища з допомогою векторів (E, D, H, B) , яким не давав механічної інтерпретації. В подальшому виявилось, що не можна говорити про рух відносно ефіру. Але ідея локального формулювання взаємодії і необхідність існування в просторі поля, яке здійснює цю взаємодію, збереглася. Поле стає початковою сутністю і характеризується величинами, які не можуть бути інтерпретовані в рамках механічних уявлень. Ясно, що поле існує в просторі і часі поряд з матерією в виді атомів, молекул і т.д., само є видом матерії, і має властиві для матерії характеристики – імпульс, енергію і т.д.

Для введення поняття поля звертаємось ще раз до закону Кулона. Позначимо через F_{12} – силу, яка діє зі сторони заряду q_1 на заряд q_2 ; F_{21} — силу, яка діє зі сторони заряду q_2 на заряд q_1 ; \vec{r}_{12} і \vec{r}_{21} – вектори, проведені із точки знаходження першого заряду в точку знаходження другого заряду і навпаки. В відповідності з цим записуємо закон Кулона в виді:

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} q_2, \quad (a) \quad (2.1.2)$$

$$F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_2}{r_{21}^2} \frac{\vec{r}_{21}}{r_{21}} q_1. \quad (a')$$

Відмічаємо, що своїм фізичним змістом ці дві формули різні і визначають сили, які діють на другий і перший заряди в точках їх знаходження, тобто, описують сили в різних просторових точках.

Але, **механізм виникнення цих сил однаковий**. Заряди q_1 і q_2 створюють в оточуючому їх просторі електричне поле (ЕП), яке

характеризується напруженістю E . Напруженість поля є локальним поняттям і має визначене значення в кожній точці простору. Напруженістю ЕП в точці називається величина, рівна відношенню сили, з якою поле діє на додатний заряд, поміщений в дану точку поля, до величини цього заряду. Тобто:

$$\vec{E}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1}{r_{12}^2} \vec{r}_{12}, \quad (\text{а}) \quad \vec{F}_{12} = \vec{F}_2 = q_2 \vec{E}_2, \quad (\text{а}') \quad (2.1.3)$$

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_2}{r_{21}^2} \vec{r}_{21}, \quad (\text{б}) \quad \vec{F}_{21} = \vec{F}_1 = q_1 \vec{E}_1, \quad (\text{б}') \quad (2.1.4)$$

Формула (2.1.3 а) описує напруженість ЕП, створеного точковим зарядом q_1 , а формула (2.1.3 б) характеризує силу, з якою поле з напруженістю \vec{E}_2 діє на заряд, що знаходиться в точці поля. Аналогічний смисл мають і формули (2.1.4).

Наголошуємо учням, що дія одного заряду на інший розділяється на два етапи:

1. Точковий заряд q створює в оточуючому його просторі ЕП, напруженість якого:

$$E(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r^2} \vec{r}, \quad (2.1.5)$$

де \vec{r} – радіус–вектор, проведений із точки знаходження заряду до точки, в якій визначається напруженість.

2. На точковий заряд q , що знаходиться в точці поля з напруженістю E , зі сторони поля діє сила

$$F = qE \quad (2.1.6)$$

Підкреслюємо, що формулювання другого етапу взаємодії, що виражається формулою (2.1.6) є локальним: напруженість E , заряд q і сила F визначається в одній і тій же точці. Формулювання першого етапу взаємодії не є локальним: напруженість E в (2.1.5) залежить не тільки від точки, де вона визначається, але і від точки знаходження джерела поля.

При вивченні принципу суперпозиції полів наголошуємо учням, що хоч закон Кулона справедливий тільки для точкових зарядів, це не означає, що

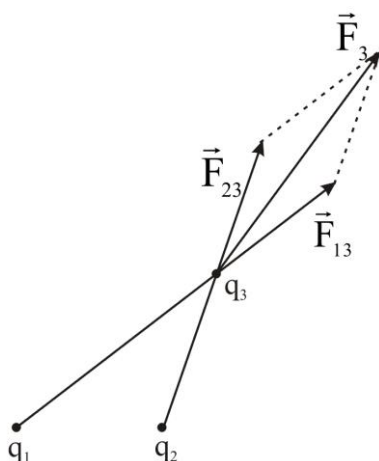
немає способів його застосування тоді, коли заряди не можна вважати точковими. У таких випадках мисленно розділяють заряджене тіло на окремі елементи і кожен із них розглядають як точковий. Потім знаходять дію кожного із цих точкових елементів на пробний заряд і сумують всі елементарні сили. Отримана векторна сума і є шуканою силою.

Можливість сумування дій окремих зарядів на який – небудь даний заряд – принцип суперпозиції – є дослідним фактом. Для ілюстрації цього спостерігаємо з учнями дію зарядженої кулі на пробний заряд (підвішену на нитці заряджену пінопластову пластину). Потім підносимо ще одну заряджену кулю, яка теж виявить дію на пробний заряд. Якщо заберемо першу кулю, то спостерігатимемо дію другої кулі, що залишилась. Подібні досліди переконують у тому, що дії різних зарядів на даний заряд незалежні.

Формулюємо принцип суперпозиції:

а) сила взаємодії двох точкових зарядів не змінюється в присутності інших зарядів;

б) сила, яка діє на точковий заряд зі сторони двох точкових зарядів, дорівнює векторній сумі сил, діючих на нього зі сторони кожного із точкових зарядів при відсутності іншого (рис. 2.1.1).



Напруженість поля двох точкових зарядів (рис. 2.1.1)

$$\vec{E}_3 = \vec{E}_{13} + \vec{E}_{23}, \quad (2.1.7)$$

яка є польовим формулюванням принципу суперпозиції, учні виводять самостійно, виходячи із тверджень а), б), а ми узагальнюємо її на випадок багатьох зарядів.

Одне із простих і дуже точних доведень Рис. 2.1.1. Принцип суперпозиції справедливості закону Кулона і принципу суперпозиції – в умовах електростатичної рівноваги всередині зарядженого провідника ЕП відсутнє.

Даємо учням наступне просте пояснення зв'язку експериментів по

виявленню поля всередині зарядженої металевої сфери з законом Кулона. Нехай маємо порожню сферичну провідну поверхню. Завдяки сферичній симетрії ЕП в довільній точці повинно бути напрямлене по радіусу – іншого напрямку бути не може. Величина поля E повинна також бути однаковою у всіх точках сферичної поверхні, тому що всі точки є еквівалентними.

Уявимо собі конус із вершиною в точці А, яка знаходиться всередині сфери, і симетричний йому конус, утворений продовженням утворюючих. Переконаємо учнів у тому, що відсутність ЕП всередині сфери можлива тоді,

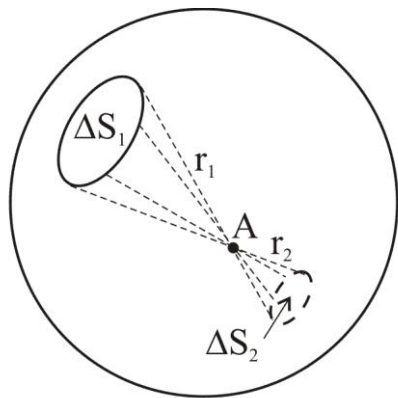


Рис. 2.1.2. У будь-якій точці А всередині зарядженої сферичної поверхні електричне поле дорівнює нулю

цими зарядами, дорівнюватиме:

$$E_1 = \frac{\sigma \cdot \Delta S_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}, \quad E_2 = \frac{\sigma \cdot \Delta S_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}. \text{ Відношення напруженостей: } \frac{E_1}{E_2} = \frac{\Delta S_1 r_2^2}{\Delta S_2 r_1^2}.$$

Очевидно, напрямки векторів \vec{E}_1 і \vec{E}_2 протилежні. Як відомо із курсу геометрії, якщо відстані від точки А до двох елементів поверхонь ΔS_1 і ΔS_2 дорівнюють r_1 і r_2 , то площі знаходяться у відношенні: $\frac{\Delta S_2}{\Delta S_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$. На основі

цього отримуємо: $\frac{E_1}{E_2} = 1$.

Отже, симетрично розміщені відносно точки А заряди сфери створюють ЕП, напруженості яких однакові за модулем, але протилежно напрямлені. Тому в точці А результуюче поле виявляється рівним нулю. Зрозуміло, коли б напруженість поля не підпорядковувалась закону обернених квадратів,

коли поле носить кулонівський характер (рис. 2.1.2). Конуси виділяють на поверхні сфери площі ΔS_1 і ΔS_2 . Якщо густина заряду σ (рівномірний розподіл внаслідок симетрії), то на цих площах містяться заряди $\sigma \cdot \Delta S_1$ і $\sigma \cdot \Delta S_2$. Конуси можна взяти настільки вузькими, що заряди можна вважати точковими. Тоді напруженість полів в точці А, створена

результат був би іншим. Отже, відсутність ЕП всередині порожнього провідника (при рівновазі зарядів) підтверджує справедливість закону Кулона і принципу суперпозиції ЕП одночасно.

2) Потенціальний характер електростатичного поля.

В шкільному курсі фізики цьому питанню приділяється значна увага. Але методика його викладу має недоліки. Найважливіший із них полягає в тому, що дана проблема розглядається тільки в енергетичному аспекті.

Проведені дослідження показують, що засвоївши енергетичне трактування потенціальності електростатичного поля учні вважають, що вихровий характер магнітного поля (МП) означає, що робота магнітних сил на замкнутому шляху відмінна від нуля. Але МП роботи при переміщенні заряду не здійснює.

Накреслимо основну методичну лінію формування понять потенціального і вихрового полів.

Електростатичне поле є безвихровим, його лінії напруженості не є замкнутими. Безвихровий характер електростатичного поля зв'язуємо з його походженням. Електростатичне поле зв'язане з електричними зарядами.

Магнітне поле породжується струмом; лінії магнітної індукції охоплюють струми і є замкнутими; магнітних зарядів не існує.

Як показує проведене нами дослідження, одного енергетичного аналізу потенціальності електростатичного поля недостатньо. Енергетичний підхід повинен йти паралельно з аналізом структури поля.

Зупинимось трохи детальніше на методиці формування поняття потенціальності електростатичного поля. Розглянувши з учнями потенціальну енергію заряду в однорідному полі і встановивши незалежність роботи електростатичних сил від форми траєкторії, аналізуємо аналогічну проблему для поля, створеного точковим зарядом. Якісний розгляд сферично – симетричного поля, лінії якого радіальні, наглядно і просто дозволяє показати учням, що потенціальність електростатичного поля зв'язана із законом Кулона.

Аналіз ЕП точкового заряду дуже важливий. Якщо обмежитись

розглядом тільки однорідного ЕП, то у учнів виникає асоціація: “однорідне поле – потенціальність”. Така асоціація, як показує проведене нами дослідження, будучи застосована до МП, приводить до труднощів у розумінні того, чому однорідне МП не є потенціальне. В той же час сферично – симетричного постійного МП з радіально розбіжними лініями індукції в природі не існує по причині відсутності магнітних зарядів.

Розглянемо короткий зміст теми. Нехай поле створюється позитивним точковим зарядом (рис. 2.1.3). Помістимо додатний пробний заряд в точці А. Нехай цей заряд переміщається під дією поля в точку В'. Оскільки переміщення відбувається вздовж напрямку дії сили, робота буде додатною. Якщо зовнішня сила поверне заряд із В' в А, то робота електричних сил в цьому випадку буде від'ємною. Очевидно, що робота туди і назад буде однаковою за модулем, а сумарна робота дорівнюватиме нулю. Нехай тепер заряд переміщається із точки А в точку В. спочатку виберемо такий шлях: вздовж дуги кола в точку В'', а потім вздовж лінії напруженості до точки В.

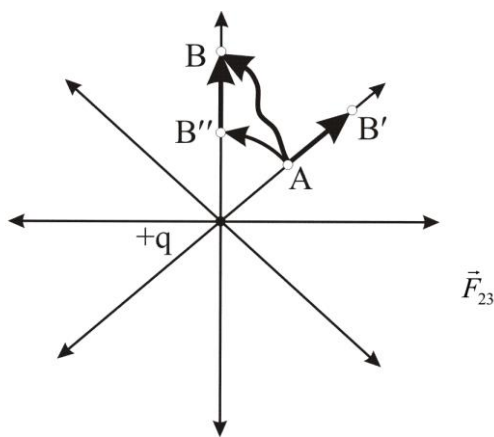


Рис. 2.1.3. При перенесенні пробного заряду з точки А у точку В по будь-якому шляху виконується одна і та сама робота

зрозуміло, що робота визначається тільки радіальною ділянкою В'В, тому що вздовж дуги електричної сили напрямлені перпендикулярно до напрямку руху заряду. При довільному переміщенні із А в В може бути зображений як сума із кусочків радіусів і малих дуг кіл. Значення роботи визначається тільки радіальним переміщенням $\Delta \vec{r}_{AB}$, яке дорівнює

різниці радіальних координат кінцевої і початкової точок траєкторії.

Пропонуємо учням самостійно розглянути випадок, коли траєкторія виходить за границі кіл з радіусами r_A і r_B (рис. 2.1.4). Підсумовуючи всі випадки, відмічаємо, що робота залежить не від форми траєкторії, а лише від початкової і кінцевої її точок. Підводимо школярів до розуміння суті тих

властивостей електричних сил, завдяки яким їх робота не залежить від форми траєкторії. Це – їх центральний характер і залежність тільки від координат.

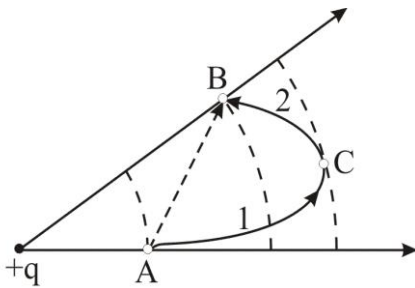


Рис. 2.1.4. Робота у електричному полі залежить від початкової і кінцевої точок траєкторії

Учням вказуємо на наступні властивості потенціалу:

потенціал φ заданого ЕП визначається з точністю до сталої;

фізичний зміст має різниця потенціалів між різними точками.

Продовжуючи формування

поняття електростатичного поля, відмічаємо учням, що характеристики поля (E, φ) визначаються розподілом заряджених тіл, а також середовищем, в якому створено поле. Для встановлення зв'язку між розподілом зарядів і характером полів користуємось положеннями вчення про симетрію. Для встановлення симетрії поля нерухомих зарядів користуємось графічним описом поля (лінії напруженості, екіпотенціальні поверхні). Роз'яснюємо учням, що картина поля, його симетрія визначається такими факторами:

1. величинами і взаємним розміщенням електричних зарядів;
 2. властивостями середовища, в якому створюється поле.
- З учнями розглядаємо поля простих систем зарядів.

а). *Точковий заряд*. Заряд має такі елементи симетрії: центральна симетрія, безліч осей симетрії і площин симетрії. Середовище однорідне (вакуум) – всі напрями і всі точки симетричні, тому середовище не змінює симетрії заряду. Отже, поле точкового заряду має такі елементи симетрії:

- 1) Центральна симетрія, що співпадає з зарядом;
- 2) Нескінченна кількість осей симетрії, що перетинаються в центрі;
- 3) Безліч площин симетрії, що перетинаються в центрі.

Таке поле називається централью – симетричним. Підводимо разом з учнями підсумки: заряд – центр симетрії поля точкового заряду. В точках, що лежать на однаковій віддалі від заряду величини напруженості однакові, бо ці точки симетричні.

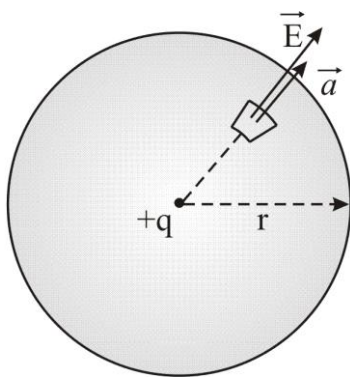
б). *Два точкових заряди.* Робимо висновок, що при внесені в поле даного заряду іншого точкового заряду симетрія цього поля порушується. Така система не має центра симетрії, але має вісь симетрії нескінченного порядку (конічна симетрія).

в). *Поле металеві сферичної поверхні чи рівномірно зарядженої кулі.* Спочатку визначаємо симетрію системи зарядів, потім визначаємо картину поля системи і порівнюємо це поле з полем точкового заряду, величина і знак якого співпадають з зарядом поверхні чи кулі. В області поза кулею ці поля повністю співпадають (адже і симетрія полів однакова). Звідси і одержуємо формулу для обчислення напруженості поля металеві сферичної поверхні чи рівномірно зарядженої кулі.

г). *Однорідне електростатичне поле.* Система зарядів, яка створена двома нескінченними паралельними металевими пластинами має:

- 1) вісь симетрії нескінченного порядку, перпендикулярну до площини;
- 2) безліч площин симетрії, що проходять через цю вісь;
- 3) пластини безмежні, а тому осей симетрії можна провести безліч, всі вони паралельні між собою.

Учням підкреслюємо, що зв'язок між ЕП і його джерелами дається теоремою Гаусса. Припустивши, що поле створено ізольованим позитивним точковим зарядом q , і що поверхнею є сфера радіусом r , в центрі якої він розміщений (рис. 2.1.5), обчислюємо потік Φ через таку поверхню. Оскільки



величина поля E в кожній точці поверхні рівна $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$, а напрямок в силу симетрії співпадає з нормаллю в цій точці, то $\hat{O} = E \cdot S = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$.

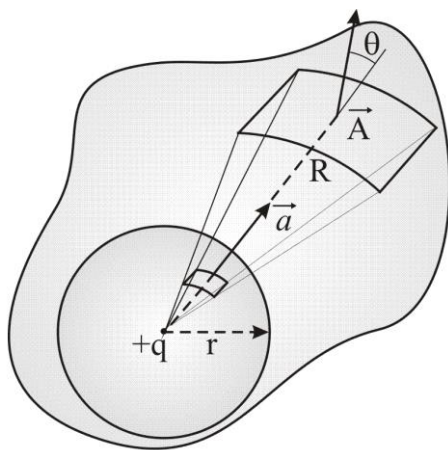
Потік не залежить від розмірів сфери.

Беремо іншу поверхню, або оболонку, яка охоплює першу, але не

Рис. 2.1.5. Обчислення потоку електричного поля точкового заряду q через сферу

сферичної форми (рис. 2.1.6).

Обчислимо повний потік через цю поверхню. Розглядаємо конус, який виходить із q і вирізає невеликий елемент \vec{a} на поверхні сфери і продовжуємо до зовнішньої поверхні, на якій він вирізає елемент \vec{A} на відстані R від точкового заряду. Відмічаємо, що площа елемента поверхні \vec{A} більша площі \vec{a} , із-за двох причин: відношення квадратів відстаней $\left(\frac{R}{r}\right)^2$ і нахилу елемента



поверхні, що дає множник $\frac{1}{\cos\theta}$, де θ – кут, утворений зовнішньою нормаллю і радіальним напрямком. ЕП в області нормалі менше від поля на сфері на множник $\left(\frac{r}{R}\right)^2$, але

Рис. 2.1.6. Потік через будь-яку замкнену поверхню навколо q дорівнює потоку через сферу

направлено теж радіально.

Якщо позначимо через $\vec{E}_{(R)}$ поле у зовнішньої ділянки і через $\vec{E}_{(r)}$ поле у сфери,

то матимемо:

$$\hat{O}_A = \vec{E}_{(R)} \vec{A} = E_{(R)} A \cos\theta$$

$$\hat{O}_r = \vec{E}_{(r)} \vec{a} = E_{(r)} a$$

Оскільки $E_{(R)} A \cos\theta = \left[E_{(r)} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \left[a \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cdot \frac{1}{\cos\theta} \right] \cos\theta = E_{(r)} a$, то приходимо до

висновку, що потоки через обидві ділянки рівні. Отже, кожну частину зовнішньої поверхні можна сумістити з частиною сферичної поверхні так, що повний потік буде однаковим через обидві поверхні. Отже, потік ЕП через довільну поверхню, що охоплює точковий заряд q , дорівнює $\frac{q}{\varepsilon_0}$.

Узагальнюємо здобуті результати на випадок довільної кількості точкових зарядів, у тому числі й на випадок зарядженого тіла:

$$\Phi_E = \begin{cases} \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i, & \text{якщо знаходиться всередині об'єму що обмежується} \\ 0, & \text{якщо знаходиться зовні об'єму що обмежується} \end{cases}$$

Розглядаємо застосування теореми Гаусса для обчислення полів рівномірно зарядженої сферичної поверхні, рівномірно зарядженої нескінченної площини та паралельних нескінченних рівномірно заряджених площин. Відмічаємо, що із теореми Гаусса випливає теорема Ірншоу, яка стверджує, що не існує такої конфігурації нерухомих зарядів, яка була б стійкою, якщо немає інших сил, крім сил кулонівської взаємодії між зарядами системи [194, с. 46].

Припустимо, що рівновага стійка. Тоді при зміщенні будь-якого із зарядів системи із його положення рівноваги в будь-якому напрямку на нього повинна діяти сила, яка намагається повернути заряд в попереднє положення. А це означає, що напруженість поля, створюваного поблизу кожного із нерухомих зарядів всіма іншими зарядами, напрямлена вздовж радіусів, які виходять із точки знаходження цього заряду. Потік напруженості цього поля крізь замкнену поверхню навколо заряду відмінний від нуля, оскільки напруженість напрямлена вздовж радіусів в одному напрямку. За теоремою Гаусса потік крізь замкнену поверхню створюється зарядом, що знаходиться в обмеженою нею об'ємі. Це суперечить вихідному припущенню про те, що він створюється зарядом, що знаходиться зовні об'єму. Цим і заперечується припущення про стійкість конфігурації нерухомих зарядів.

Слід відмітити, що теорема Ірншоу дозволяє пояснити учням будову атома під час вивчення квантової фізики [194, с. 48].

2.2 Використання ідей симетрії, відносності та інваріантності електричного заряду при формуванні поняття магнітне поле

У програму з фізики для профільних класів [172, с. 12] при вивченні магнітного поля включено наступні питання:

Електрична і магнітна взаємодії. Взаємодія провідників зі струмом.

Магнітне поле струму. Силкові лінії магнітного поля прямого і колового струмів.

Індукція магнітного поля. Потік магнітної індукції. Дія магнітного поля на провідник зі струмом. Сила Ампера. Взаємодія струмів. Дія магнітного поля на рухомі заряджені частинки. **Сила Лоренца. Рух зарядженої частинки в однорідному полі. Використання сили Лоренца в техніці. Циклотрон. Мас-спектрограф.** Закон Біо-Савара-Лапласа. **Контур зі струмом в магнітному полі.** Момент сил, що діє на прямокутну рамку зі струмом у магнітному полі. **Магнітний момент струму.** Принцип дії електродвигуна та електровимірювальних приладів.

Магнітні властивості речовини. Діа-, пара- і феромагнетики. *Намагнічування магнетиків. Магнітний гістерезис.* **Застосування магнітних матеріалів. Магнітний запис інформації. Електродинамічний мікрофон.** **Вплив магнітного поля на живі організми.**

Відомо декілька методичних підходів до формування понять магнітного поля (МП) і вектора магнітної індукції.

В релятивістському підході магнетизм розглядається як простий релятивістський наслідок взаємодії зарядів [137, с. 55-61]. Перевага цього підходу з наукової точки зору безперечна: релятивістська суть магнетизму при цьому виступає безпосередньо. Але такий виклад вимагає ґрунтовної попередньої підготовки школярів.

Традиційний підхід до формування поняття МП базується на вивченні взаємодії струмів [182, с. 114]. Він має ряд дидактичних переваг: тісний зв'язок з курсом фізики 8-го класу; розвиток ідеї поля як особливої форми матерії; використання доступного фізичного експерименту.

Ще один підхід [137, с. 57; 162, с. 183] базується на вивченні взаємодії рухомих зарядів, а не електричних струмів. На дослідах з електронними пучками з'ясовується вплив руху зарядів на їх взаємодію. Такий шлях доступний для школярів, його перевага в тісному зв'язку між розглядом макроскопічних і мікроскопічних явищ.

Суть нашого підходу полягає в тому, що магнітна взаємодія електричних струмів є наслідком закону Кулона. Якщо постулати теорії відносності справедливі, електричний заряд інваріантний і має місце закон Кулона, то явища, які прийнято називати “магнітними”, повинні існувати. Вони є результатом електричної взаємодії між зарядом, що перебуває в русі і іншими зарядами, що рухаються. Магнітна сила є релятивістським наслідком закону Кулона.

Традиційний підхід до вивчення МП не дає можливості реалізувати приведені вище ідеї. Тому основою для структурування розділу “Магнітне поле” в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки мають служити фундаментальні фізичні принципи і поняття. Використання ідей симетрії, відносності при вивченні МП в школі як в плані методичної стратегії вивчення матеріалу, так і щодо логіки введення законів є об’єктивно обумовленим.

Вивчення МП починається із дослідження магнітних взаємодій: експеримент показує, що два тонкі прямолінійні паралельні провідники, по яких проходить струм притягуються один до одного, якщо струми в них мають однаковий напрямок, і відштовхуються, якщо струми протилежні [182, с. 144].

Відомо, що математичний вираз сили взаємодії між двома тонкими прямолінійними паралельними провідниками у вакуумі, по яких тече струм, було встановлено експериментально і має вигляд:

$$F_{12} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r} \Delta l, \quad (2.2.1)$$

де F_{12} – сила, з якою провідник, із силою струму I_1 , діє на елемент довжиною Δl провідника, по якому тече струм силою I_2 . Знак “мінус” показує, що при однакових напрямках I_1 і I_2 між провідниками діє сила притягання; якщо напрямки I_1 і I_2 протилежні, то виникає сила відштовхування.

Якщо об’єкти не діють один на одного безпосередньо, але між ними виникають сили взаємодії, то, за аналогією із електростатикою, робимо висновок, що ці об’єкти створюють в просторі поля, які і діють на відповідні

об'єкти [162, с. 150]. Тому аналогічно з польовим трактуванням кулонівської взаємодії процес виникнення сили (1) пояснюється так:

- а) струм I_l створює у оточуючому просторі МП;
- б) МП діє на струми чи заряди.

Учні знають, що провідник із струмом є електрично нейтральною системою зарядів, в якій заряди одного знаку рухаються в один бік, а заряди іншого знаку – в протилежний. Отже, МП породжується рухомими зарядами.

Демонструємо учням відхилення пучка електронів в осцилографічній трубці під дією МП прямого провідника (чи прямолінійного магніту) [162, с. 152; 194, с. 213]. Дослід показує, що на заряджену частинку, яка влітає зі швидкістю \vec{v} в МП, діє сила \vec{F} , яка характеризується такими ознаками:

- 1) \vec{F} перпендикулярна до швидкості \vec{v} заряджених частинок;
- 2) \vec{F} перпендикулярна до визначеного напрямку в просторі, де існує МП;

3) для всіх частинок відношення $\frac{|\vec{F}|}{qv_{\perp}}$ є однаковим, де $|\vec{F}|$ – модуль розглядуваної сили; q – заряд частинки; v_{\perp} – складова швидкості, перпендикулярна до вказаного вище напрямку в просторі, в якому існує МП.

Оскільки в просторі, де існує МП, є деякий виділений напрямок, з яким зв'язана сила, що діє на рухомий заряд, то для опису цієї сили вводимо векторну характеристику МП.

Те, що для всіх частинок, який би не був у них заряд q і яка б не була у них складова швидкості v_{\perp} , залишається постійним відношення $\frac{|\vec{F}|}{qv_{\perp}}$, говорить

про те, що саме ця величина є *характеристикою* МП і називається *магнітною індукцією*. Отже, магнітна індукція – це вектор,

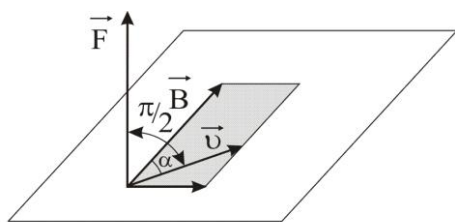


Рис. 2.2.1. Сила, що діє на рухомий заряд у МП

рівний за модулем $|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}|}{qv_{\perp}}$ і напрямлений перпендикулярно до площини, утвореної векторами \vec{v} і \vec{F} .

Із співвідношення $|B| = \frac{|F|}{qv_{\perp}}$ знаходимо (рис.2.2.1): $|F| = |qv_{\perp}|B = qv|B|\sin\alpha$

Модуль сили F дорівнює добутку модулів векторів v і B , помноженому на q та на синус кута між ними. Як видно із рис. 2.2.1, сила F напрямлена перпендикулярно до площини, яку утворюють вектори v і B . На факультативному занятті для учнів профільних класів доцільно ввести поняття векторного добутку двох векторів – це вектор, чисельно рівний добутку модулів цих векторів на синус кута між ними, що має напрям перпендикулярний до площини, в якій знаходяться ці вектори, за правилом правого гвинта.

Отже, сила, яка діє на заряд q , що рухається у МП, являє собою векторний добуток векторів v і B , помножений на q , ($\vec{n} \perp B$, $\vec{n} \perp v$, $|\vec{n}|=1$).

$$F = q[v \times B] = nqv|B|\sin\alpha \quad (2.2.2).$$

Ця сила напрямлена завжди перпендикулярно до швидкості руху зарядженої частинки і отже, ніколи не виконує роботу при русі заряду в МП.

Якщо ж ЕП і МП діють на заряд q незалежно, то при сумісній дії ЕП і МП виникає сила $F = F_e + F_i$, тобто:

$$F = q(E + [vB]) = qE + nqv|B|\sin\alpha \quad (2.2.3).$$

Ця сила називається силою Лоренца. Учням підкреслюємо, що в нерелятивістському наближенні сила Лоренца, як і всяка інша сила не залежить від вибору інерціальної системи відліку (ІСВ). Але другий доданок у (2.2.3) змінюється при переході від однієї СВ до іншої. Тому змінюється і перший доданок qE . Отже, поділ повної сили F на електричну і магнітну залежить від вибору СВ.

Важливо наголосити, що силу Лоренца (як і силу Ампера) не можна розглядати як звичайний вектор, який визначається трьома проекціями на осі координат. Вона визначається шістьма компонентами – проекціями векторів v і B . Такі вектори називаються аксіальними (на відміну від полярних).

При вивченні МП показуємо учням, що магнітна взаємодія між рухомими зарядами є релятивістським ефектом. Це є доказом фундаментальної єдності законів природи [137, с. 59].

Учням констатуємо факт, що узагальненням експериментальних даних встановлено закон, який визначає МП точкового заряду q , який рухається рівномірно з малою швидкістю ($v \ll c$) у вакуумі, ($\vec{n} \perp \vec{r}$, $\vec{n} \perp \vec{v}$, $|\vec{n}|=1$) [137, с. 69]:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{[\vec{v} \times \vec{r}]}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{|\vec{v}| |\vec{r}| \sin \alpha}{r^3} \quad (2.2.4)$$

Розповідаємо про дослід Роланда [194, с. 221]. Для цього учням профільних (фізичних, фізико-математичних, фізико-технічних) класів поглиблюємо поняття про електричну конвекцію – явища, пов'язані з рухом у просторі наелектризованого тіла. Питанням про існування електричної конвекції або конвекційного електричного струму вважають питання про виникнення магнітного поля при русі наелектризованого тіла. Це питання має величезне значення у фізиці, оскільки негативна відповідь на нього змусила б відкинути усі існуючі теорії електричного струму. Відмінною ознакою явища електричного струму вважається виникнення магнітних силових ліній навколо шляху струму (провідника, що несе струм). Цілий ряд явищ, починаючи з явища виникнення струму при зарядженні і розрядженні статичної електрики, підтверджують думку про те, що електричний струм можна розглядати як рух у просторі електричного заряду. Для остаточного підтвердження цього положення необхідно було провести такий дослід: привести в рух наелектризоване тіло і досліджувати, чи виникне при цьому магнітне поле. Цей дослід, простий за своєю ідеєю, представляє великі труднощі при його практичному виконанні. Якщо узяти два однойменно наелектризованих тіла, то вони повинні відштовхуватися одне від іншого. Якщо їх привести в рух у паралельних напрямках, то через виникнення магнітних полів, між ними виникає притягування, що зменшує відштовхування, але це притягування буде дуже мале. Теоретичний розрахунок показує, що для рівності цих дій (притягування і відштовхування) необхідно довести швидкість руху цих зарядів до швидкості

поширення світла. Отже, щоб спостерігати магнітну дію рухомого електричного заряду, порівнянну з подібною ж дією електричного струму, необхідно або надати тілу дуже велику швидкість, що зустрічає непереборні механічні труднощі, або оперувати з великими зарядами електрики, що зустрічає труднощі ізолювання цих зарядів внаслідок високих потенціалів, які вони повинні мати із-за малої ємності провідників. Першим провів подібний дослід в 1878 р. відомий американський фізик Роуланд.

Схема досліду полягала в наступному. Діелектричний диск (з ебоніту або скла) з позолоченими бічними поверхнями обертався навколо своєї осі між заземленими обкладками конденсатора; на бічну поверхню диска наносились заряди, і їх дія при обертанні диска виявлялася за допомогою чуттєвої магнітної стрілки. Дослід показав, що відхилення стрілки пропорційне нанесеному заряду і кутовій швидкості обертання; при зміні знаку заряду або напрямку обертання диска на протилежний, відхилення магнітної стрілки також змінюється на протилежне [162, с. 210].

Якщо в системі спокою заряду в провіднику є струм провідності, то при русі такого зарядженого провідника в лабораторній системі відліку додатково до цього струму з'являється конвекційний струм вільних зарядів. Цей конвекційний струм спостерігався і вимірювався Роуландом. Переміщення з постійною швидкістю незарядженого провідника зі струмом приводить до появи на ньому в лабораторній системі відліку заряду. Це ще один важливий наслідок теорії відносності.

Дослід Роуланда довів, що конвекційний струм вільних зарядів на рухомому провіднику за своєю магнітною дією тотожний струму провідності в провіднику, що перебуває в стані спокою. Цей дослід, поставлений Г. Роуландом (H. Rowland) в 1878, зіграв важливу роль в підтвердженні рівнянь Максвелла для рухомих середовищ і експериментальному доведенні спеціальної теорії відносності стосовно електромагнітних явищ.

Эйхенвальд і Хімстер також підтвердили результати Роуланда. Особливо цінними є досліди Пендера, Хімстера і Эйхенвальда. Ці досліди були так

ретельно поставлені і дали такі узгоджені між собою і з теорією результати, що можуть служити не лише для вирішення питання про існування електричної конвекції але і для експериментального визначення відношення електромагнітних одиниць до електростатичних, рівного швидкості світла. Отже, факт магнітної дії рухомого електричного заряду експериментально встановлений. Нерозривно з питанням про існування електричної конвекції пов'язане питання про існування струмів зміщення. Якщо ми припустимо, що в розімкненому провіднику відбувається переміщення електричних зарядів, то це переміщення збуджує магнітне поле навколо провідника, яке є показником існування електричного струму в провіднику. Одночасно безперервно змінюватиметься і величина електричної сили в різних точках, що лежать за кінцями провідника в оточуючому провідник діелектрику. Така зміна діелектричної поляризації має бути рівносильна струму, і тому повинна створювати магнітне поле. Подібний струм називається струмом зміщення. Сума усіх струмів зміщення в діелектрику, який оточує цей провідник, повинна дорівнювати силі струму в провіднику. Таким чином, не лише струми в замкнутих, але і струми в розімкнених провідниках потрібно вважати замкнутими. Першим існування струмів зміщення показав Рентген. Ейхенвальд повторив досліди Рентгена і дійшов такого ж висновку. Дослід Ейхенвальда був поставлений таким чином: ебонітовий вертикальний диск обертався на горизонтальній осі між двома плоскими провідними кільцями. Кожне з кілець розрізне по діаметру. Розрізи кілець приходилися один проти іншого. Кожна з половин кільця заряджалася протилежно відповідній половині іншого кільця і другій половині того ж кільця. При обертанні ебонітового диску в точках, що проходили проти розрізів, збуджувався струм, напрям якого був від розрізу одного кільця до розрізу іншого перпендикулярно до площини кільця. Цей струм зміщення міг бути виявлений і виміряний допомогою магнітної стрілки, повішеної над однією парою розрізів і мав напрям, перпендикулярний до площини кільця. Напрямок відхилення стрілки змінювався із зміною напрямку обертання круга і з перезарядкою металевих кілець. Таким чином, існування

струмів зміщення доведено експериментально.

Эйхенвальд довів точними кількісними вимірюваннями (1903 р.), що конвекційний струм вільних зарядів на рухомому провіднику і струм зв'язаних зарядів, що виникає при русі наелектризованого діелектрика збуджують магнітне поле так само, як і струм провідності в провіднику, що покоїться, тобто поляризований не намагнічений діелектрик при русі стає намагніченим.

Схема досліду така: діелектричний диск (завтовшки d) з діелектричною проникністю ε обертається між двома кільцевими співвісними диску обкладками конденсатора (шириною b); обкладки конденсатора, що мають розріз, підключаються до батареї з напругою і можуть обертатися навколо загальної осі незалежно від діелектричного диска. Досліди полягали в почерговому обертанні обкладок конденсатора або диска, в порівнянні магнітної дії усіх видів струмів, і в експериментальному доведенні їх еквівалентності.

За відсутності діелектрика на обкладках зарядженого конденсатора утворюється поверхневий заряд, при обертанні обкладок зі швидкістю, цей заряд створює конвекційний струм (струм Роуланда). Якщо ж між обкладками знаходиться діелектричний диск, то при обертанні діелектричного диска між обкладками, що перебувають в стані спокою, виникає струм (струм Рентгена), викликаний тим, що рухомий поляризований діелектричний диск намагнічується в радіальному напрямку. При обертанні усієї системи в цілому повний струм не залежить від діелектричної проникності диска; це підтверджує справедливість основних принципів теорії відносності стосовно рухомих середовищ.

У досліді Эйхенвальда був також виміряний струм поляризації. Якщо одну з обкладок заземлити, а іншу розділити додатковою щілиною на два півкільця, до яких підключити два різні полюси батареї, то при обертанні диска діелектрик буде половину оберту знаходитися в полі одного знаку, а іншу половину оберту - в полі протилежного знаку. Така схема досліду дозволила компенсувати струм Рентгена і спостерігати струм поляризації, обумовлений

зміною в часі поляризації диска, що обертається.

Підсумовуємо знання учнів профільних (фізичних, фізико-математичних, фізико-технічних) класів: оскільки простір ізотропний, то для нерухомого заряду всі напрямки виявляються рівноправними. Тому електростатичне поле, яке створюється точковим зарядом, є сферично – симетричним.

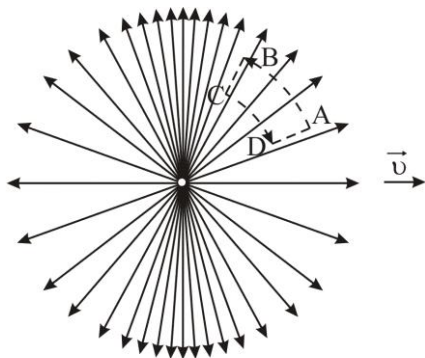


Рис. 2.2.2. Електричне поле заряду, \vec{v} під прямим кутом до напрямку руху, що рівномірно рухається

У випадку руху заряду з швидкістю \vec{v} (рис. 2.2.2) в просторі появляється визначений напрямок (напрямок вектора \vec{v}). Поле точкового заряду, який рухається із швидкістю виявляється сильніше, ніж поле в напрямку руху на тій же відстані від заряду (рис. 2.2.2). Таке поле має осьову симетрію і крім того, не може бути створене ні одним *стаціонарним* розподілом зарядів. Отже,

якщо заряд рухається, то ЕП в будь-якій точці змінюється з часом.

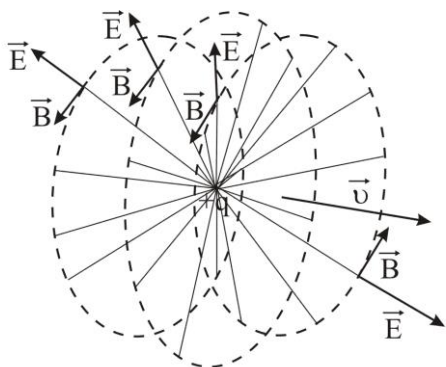


Рис. 2.2.3. Електричне і магнітне поля заряду, що рівномірно рухається в даний момент часу

Із міркувань симетрії і співвідношення (2.2.4) лініями МП повинні бути кола, розміщені навкруги напрямку руху. Коли швидкість руху заряду велика, радіальні “спиці”, які є лініями ЕП, зливаються в тонкий диск.

Кругові лінії МП також концентруються в цьому диску (рис. 2.2.3). Із проведених вище міркувань робимо висновок про напрямок і модуль (на основі

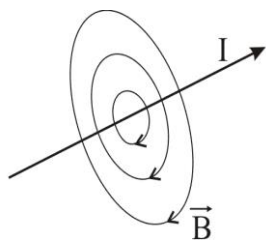


Рис. 2.2.4. Напрямок вектора магнітної індукції нескінченно довгого прямолінійного провідника зі струмом

формули 2.2.1) вектора магнітної індукції нескінченно довгого тонкого прямолінійного провідника зі струмом (рис. 2.2.4).

Формулюємо принцип симетрії для МП: симетрія МП струму – це сукупність

спільних елементів симетрій системи провідників із струмом. (У школі МП вивчаються у вакуумі чи повітрі, які є однорідними та ізотропними і тому симетрії поля не змінюють) [162, с. 210].

Вивчення симетрії поля розпочинаємо з однорідного поля. Спочатку розглядаємо поле колового струму в його центрі. Виходячи із міркувань

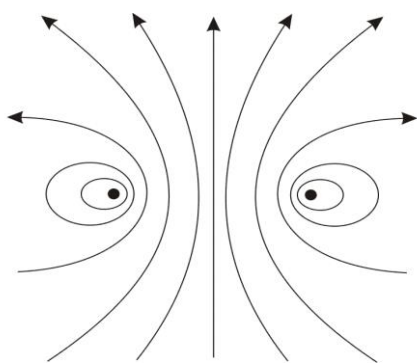


Рис. 2.2.5. Силкові лінії магнітного поля кільця зі струмом

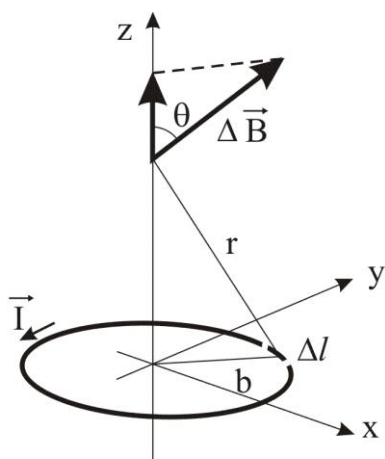


Рис. 2.2.6. Обчислення магнітного поля на осі кільця зі струмом

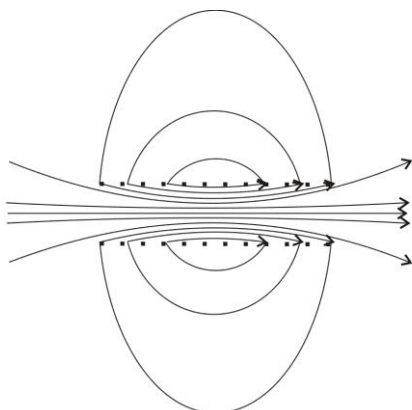


Рис. 2.2.7. Силкові лінії магнітного поля всередині і навколо соленоїда

симетрії і формули (2.2.4) встановлюємо напрямок вектора \vec{B} . МП колового струму повинно мати вигляд, зображений на рис. 2.2.5.

Поле в цілому матиме симетрію відносно осі z (рис. 2.2.6), а самі силкові лінії будуть симетричні відносно площини xOy .

Поле поблизу колового струму буде нагадувати поле поблизу довгого прямого провідника, тому що тут відносне значення віддалених частин петлі невелике. Встановлюємо основні елементи симетрії поля колового струму:

- 1) вісь симетрії нескінченного порядку, що співпадає з віссю кільця;
- 2) площина симетрії, що проходить через коловий струм;
- 3) центр симетрії – центр колового струму.

Площин симетрії, які проходять через вісь, немає. Це зумовлено тим, що сам коловий струм не має таких площин симетрії, бо він тече у певному напрямку.

Демонструємо спектр поля соленоїда з

струмом, визначаємо симетрію однорідного МП всередині соленоїда: це поле має таку ж симетрію, як і поле колового струму (рис. 2.2.7). Наявність перпендикулярної до вектора \vec{B} площини симетрії – особливість МП.

Розглядаємо два однойменних точкових заряди q_1 і q_2 , які рухаються вздовж паралельних прямих з однаковою швидкістю U ($U \ll c$) (рис. 2.2.8). При $U \ll c$ ЕП практично не відрізняється від поля нерухомих зарядів. Тому величина F_e , яка діє на заряди, дорівнює:

$$F_{e1} = F_{e2} = F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (2.2.5)$$

Для магнітної сили F_m , яка діє на заряди, отримуємо вираз, враховуючи (2.2.4) і (2.2.2):

$$F_{i1} = F_{i2} = F_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 q_2 U^2}{r^2} \quad (2.2.6)$$

($\vec{r} \perp U$). Знайшовши відношення (2.2.6) до (2.2.5), отримаємо:

$$\frac{F_i}{F_e} = \epsilon_0 \mu_0 U^2 = \frac{U^2}{c^2}. \quad (2.2.7)$$

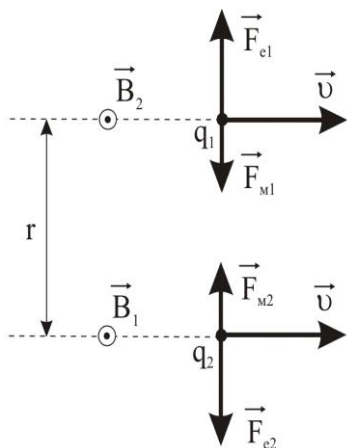


Рис. 2.2.8. Сили взаємодії двох однойменних точкових зарядів, які рухаються вздовж паралельних прямих з однаковою швидкістю заряду, магнітна взаємодія зарядів і струмів є наслідком закону Кулона [137, с. 61-63].

Із (2.2.7) слідує, що магнітна сила слабша кулонівської на множник $\left(\frac{U}{c}\right)^2$. Отже, магнітна взаємодія рухомих зарядів – релятивістський ефект [137, с. 59].

При вивченні СТВ показуємо учням профільних (фізичних, фізико-математичних, фізико-технічних) класів, що базуючись на постулатах теорії відносності і інваріантності електричного заряду, магнітна взаємодія зарядів і струмів є наслідком закону Кулона [137, с. 61-63].

Один із важливих результатів дослідження МП полягає в тому, що вектори індукції поля в різних точках дотичні до ліній індукції. В цьому виявляється корінна відмінність МП від електростатичного. При дослідженні

МП учні переконуються, що лінії цього поля замкнені. Елементарний закон (2.2.4) визначає МП заряду, що рухається рівномірно. Припускаючи, що МП створюється тільки такими зарядами, знаходимо потік вектора \vec{B} через замкнену поверхню, та циркуляцію того ж вектора по замкнутому контуру.

Відмічаємо, що для МП зарядів, які рухаються, справедливий принцип суперпозиції. Крім того, потік геометричної суми декількох векторів через довільну поверхню дорівнює алгебраїчній сумі потоків цих векторів через цю поверхню. Тому при обчисленні магнітного потоку обмежуємось частковим випадком – \vec{B} створюється окремим точковим зарядом, що рівномірно рухається зі швидкістю \vec{U} перпендикулярно до площини малюнку (рис. 2.2.9).

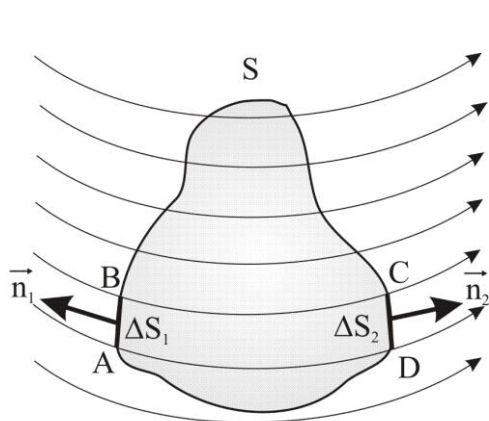


Рис. 2.2.9. Виведення теореми Гаусса для магнітного поля

Магнітними силовими лініями будуть коаксіальні кола, площини яких паралельні площині малюнку, а центри розміщені на прямій, вздовж якої рухається заряд. Візьмемо нескінченно тонку кільцеву трубку ABCD, утворену магнітними силовими лініями. Оскільки поле рухомого заряду має осьову симетрію, то магнітний потік через поперечний переріз трубки буде залишатися постійним. Трубка перетинає замкнену поверхню S парну кількість разів, наприклад, два. Магнітні потоки через площі ΔS_1 і ΔS_2 , які трубка вирізає із поверхні S , однакові за величиною, але протилежні за знаком. Сума потоків через такі площі дорівнює нулю. Але весь простір можна розбити на нескінченно тонкі кільцеві магнітні трубки, причому кожна з них не буде вносити ніякого вкладу в магнітний потік через замкнену поверхню S . Отже, магнітний потік через довільну замкнену поверхню дорівнює нулю (теорема Гаусса для вектора \vec{B}) [194, с. 230; 246, с. 269]:

$$\sum_n \vec{B}_n \Delta S = 0. \quad (2.2.8)$$

Формула (2.2.8) означає, що магнітних зарядів не існує.

Вводимо поняття про циркуляцію вектора \vec{B} і виводимо формулу для її

обчислення у випадку стаціонарного МП довгого прямолінійного провідника зі струмом [59; 182, с. 145; 226, с. 271]:

$$\sum \vec{B} \vec{N} = \mu_0 I. \quad (2.2.9)$$

В постійному однорідному МП B рух зарядженої частинки з імпульсом \vec{p} визначається рівнянням: $\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = q[\vec{v} \times \vec{B}]$, де \vec{v} – швидкість частинки. Частинка рухається в загальному випадку по гвинтовій лінії (вісь гвинта співпадає з напрямком магнітного поля). Якщо $\vec{p} \perp \vec{B}$, то частинка рухається по колу з радіусом $r = \frac{p}{qB}$ такий рух описується трьома векторами: аксіальний B і полярний \vec{v} вектори породжують за правилом векторного добутку полярний вектор, орієнтований перпендикулярно до них. Магнітна складова сили Лоренца, що відповідає цьому добутку і викривляє траєкторію.

Відмічаємо, що рівняння руху частинки у полях E і B зі швидкістю U : $\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = eE + q[\vec{v} \times \vec{B}]$, інваріантне по відношенню до операції заміни знаку часу ($t \rightarrow -t$), якщо прийняти, що при такій заміні справедливі співвідношення: $E \rightarrow E$; $B \rightarrow -B$. Зміна напрямку МП на протилежний означає зміну напрямку струму. Отже, при інверсії часу заряди зберігають свої знаки, а напрямок їх руху змінюється на протилежний. Учням підкреслюємо той факт, що закони електромагнетизму завжди інваріантні по відношенню до дзеркальних відображень, тому що при знаходженні повної взаємодії ми користуємось правилом правої руки двічі – один раз, щоб знайти B із струмів, а потім, щоб знайти силу, з якою діє поле B на інший струм.

2.3 . Вивчення законів постійного струму та розв'язання задач на обчислення опору кіл з використанням принципу симетрії

У програму з фізики для профільних класів [172, с. 10] при вивченні електричного струму включено наступні питання:

Електричний струм. Електричне коло. Джерела і споживачі електричного струму. Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола. Електричні кола з послідовним і паралельним з'єднанням провідників. Розгалужені кола Розрахунок електричних кіл. Правила Кірхгофа. Шунти і додаткові опори Коротке замикання. Робота та потужність електричного струму. Теплова дія струму. Міри та засоби безпеки під час роботи з електричними пристроями.

Як показує педагогічний експеримент, проведений нами, значні труднощі в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних, фізико-технічних) класів викликають задачі на обчислення опору кіл, в яких резистори з'єднані в складний каркас. В загальному випадку такі задачі розв'язуються з допомогою правил Кірхгофа [182, с. 108; 226, с. 228], чи інших методів розрахунку (метод контурних струмів, метод вузлових потенціалів, метод перетворення еквівалентних кіл і ін.). В школі вивчають лінійні електричні кола, тому для обчислення їх опору використання принципу симетрії особливо ефективно.

Учням формулюємо принцип симетрії П.Кюрі [96, с. 75-120]: якщо причина має який – небудь елемент симетрії, то такий же елемент симетрії буде мати і наслідок. Це означає, що якщо наслідок не містить якого – небудь елемента симетрії, то цей елемент симетрії відсутній і в сукупності елементів симетрії причин.

Розглядаючи симетричні електричні кола та застосовуючи до них принцип симетрії, приходимо до висновку: симетрія сполучення провідників, симетрія величин їх опорів та симетрія способу підведення напруги (симетрія причин) проявляється у симетрії струмів та потенціалів вузлових точок кола (симетрія наслідків).

Розглядаємо симетричну систему резисторів, опір яких рівний і дорівнює R , в якій напругу підведено до вузлів, що знаходяться в площині або на осі симетрії. Використовуючи принцип симетрії, отримуємо: потенціали вузлів, які симетричні відносно площини або осі симетрії рівні, а струми, які протікають по симетрично розміщених резисторах, однакові. В цьому випадку ми маємо

справу з повною еквівалентністю симетричних резисторів. Відповідну площину чи вісь симетрії називаємо фізичною (у симетричних елементах відбуваються однакові фізичні процеси).

Якщо система резисторів має площину або вісь симетрії, а напругу від джерела підведено до точок, симетричних відносно цієї площини або осі, то з принципу симетрії випливає, що всі вузли і точки, які лежать у площині чи на осі симетрії, є еквіпотенціальними. В цьому випадку вітки кола не будуть повністю еквівалентними, а тому відповідна площина чи вісь симетрії називається геометричною.

Розв'язування задач на обчислення величин опорів симетричних електричних кіл зводиться до відшукування еквіпотенціальних вузлів, розглянувши фізичні і геометричні елементи симетрії кола. Учням даємо алгоритм розв'язання таких задач:

1. Встановити симетрію кола (центр симетрії, площина чи вісь) та її характер (фізична чи геометрична).

2. Виходячи із симетрії кола, відшукати еквіпотенціальні точки.

3. Побудувати еквівалентну схему електричного кола, виконавши над нею такі перетворення:

а) з'єднати еквіпотенціальні вузли в один вузол;

б) виключити із кола ті ділянки, які з'єднують вузли із однаковими потенціалами;

в) розвести вузли (замінивши їх кількома вузлами, що мають той же потенціал, що і вихідний вузол);

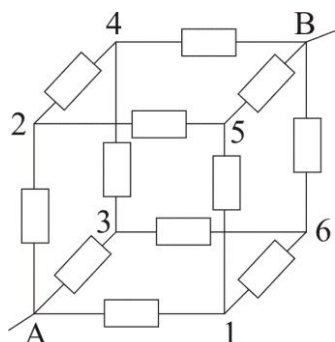


Рис. 2.3.1.а.

г) розвести вітки схеми, замінивши їх двома симетричними вітками;

4. Користуючись формулами послідовного і паралельного з'єднання провідників, обчислити опір еквівалентної схеми.

Розглядаємо приклади застосування принципу симетрії для розв'язування задач на обчислення опору

складного електричного кола.

Задача. Знайти опір каркаса куба R , складеного із провідників з однаковим опором r (рис. 2.3.1.а.).

Для розв'язання цієї задачі встановлюємо з учнями, що куб симетричний відносно повороту навколо діагоналі АВ на кут 120° . Отже, вісь АВ є фізичною віссю симетрії. Тому всі вузли кола, симетричні відносно осі АВ, будуть екіпотенціальними. Тобто, вузли 1, 2, 3 і вузли 4, 5, 6 екіпотенціальні, а тому $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$, $\varphi_4 = \varphi_5 = \varphi_6$. Об'єднаємо вузли 1, 2 і 3 в один вузол а, а вузли 4, 5 і 6 – в другий вузол б. Одержимо еквівалентну схему кола, зображену на рис. 2.3.1.б., у якій $R_{Aa} = \frac{1}{3}r$, $R_{ab} = \frac{1}{6}r$, $R_{bB} = \frac{1}{3}r$, $R_{\text{внутр}} = \frac{5}{6}r$.



Рис. 2.3.1.б.

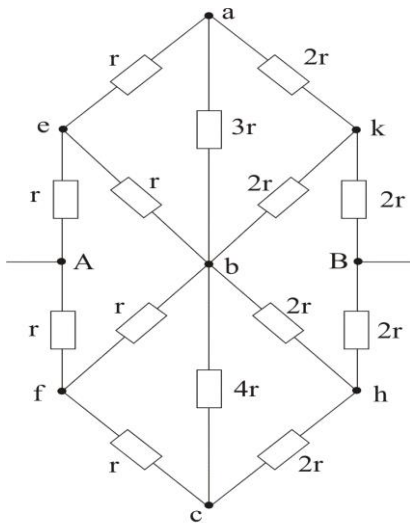


Рис. 2.3.2.а.

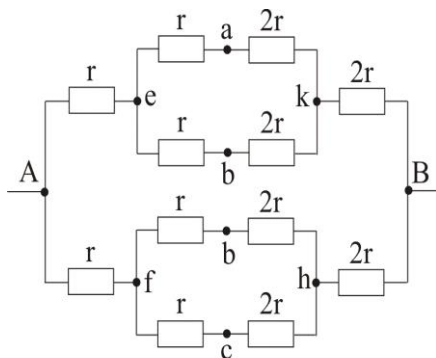


Рис. 2.3.2.б.

Учні знають, що на ділянці кола між двома екіпотенціальними вузлами струм не протікає. Отже, якщо цю ділянку виключити із кола, то електричні параметри кола не зміняться. Учням пропонуємо розв'язати наступну задачу: знайти опір кола, зображеного на рис. 2.3.2.а.

Із схеми включення опорів бачимо, що схема має геометричну вісь симетрії abc, тобто різниця потенціалів між точками а, b і с дорівнює нулю, оскільки спади напруги на ділянках кола Aea, Afc, Aeb і Afb однакові.

Отже, струм через опори $3r$ і $4r$ не протікає. Тому ці опори можна виключити і обчислювати опір за еквівалентною схемою (рис. 2.3.2.б.). Опір між точками е і h та між точками f і h $R_{e,f} = (r+2r)/2=1,5r$. Загальний опір: $R=(r+1,5r+2r)/2=2,25r$.

Іноколи деякий вузол складного кола можна представити як декілька вузлів, потенціали яких рівні і рівні потенціалу вихідного вузла. Така заміна

не змінює електричних параметрів кола, при умові, що вихідний вузол лежить у площині чи на осі симетрії, а джерело напруги під'єднане до точок, що також лежать у площині чи на осі симетрії. Рис. 2.3.3.а., б., в. ілюструють все сказане вище.

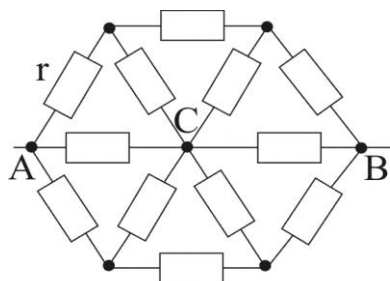


Рис. 2.3.3.а.

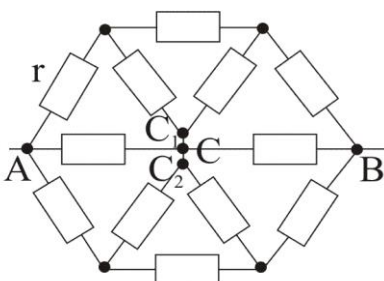


Рис. 2.3.3.б.

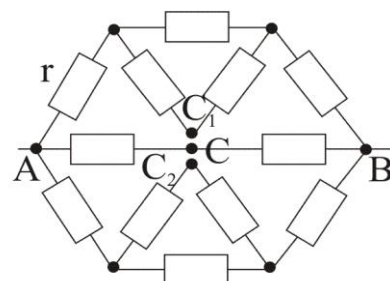


Рис. 2.3.3.в.

У багатьох випадках корисно при одержанні еквівалентної схеми замінити дві чи більше паралельних вітки кола однією еквівалентною віткою. Інколи корисно здійснювати обернену операцію: дану вітку замінити кількома (здебільшого двома) паралельними вітками. В цьому випадку опір r між двома вузлами замінюють двома паралельними з'єднаними опорами величиною $2r$.

Зрозуміло, що останню операцію можна виконати лише тоді, коли ці вузли лежать в площині чи на осі симетрії. Так, для того, щоб відшукати опір ділянки кола АВ, зображеного на рис. 2.3.4.а. (всі опори рівні r), застосуємо

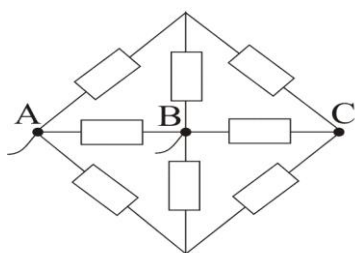


Рис. 2.3.4.а.

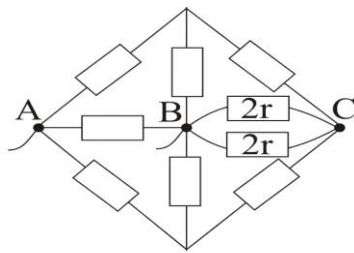


Рис. 2.3.4.б.

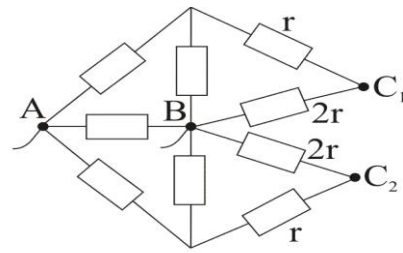


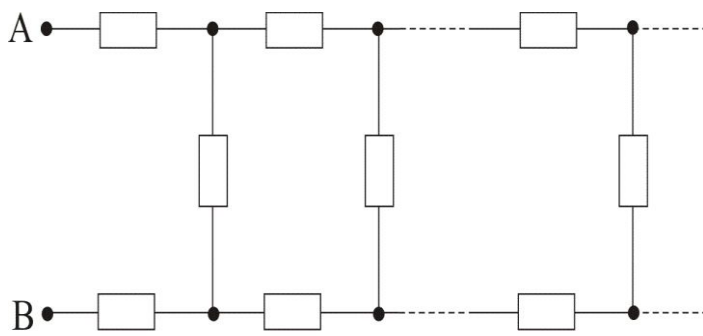
Рис. 2.3.4.в.

приведені вище міркування (рис. 2.3.4.б., в.). З еквівалентної схеми

(рис. 2.3.4.в.) легко отримуємо $R_{AB} = \frac{7}{15}r$.

Для розв'язування задач можна скористатися трансляційною симетрією. Трансляційною симетрією володіють нескінченні об'єкти, як наприклад, кристалічна решітка кристала. Розглянемо наступну задачу: знайти опір кола, зображеного на рис. 2.3.5.а. (всі опори рівні r). Припустимо, що шуканий опір

кола дорівнює R . Вісь симетрії кола – вісь трансляції, спрямована вздовж ланцюга. Провівши трансляцію кола вздовж осі симетрії на відстань, рівну відстані між двома сусідніми комірками, одержимо таку ж саму схему, хіба що на одну ланку довшу. Відділивши уявно цю комірку, одержимо таку ж саму схему, що має такий же опір R . Тому наш ланцюг можна замінити такою еквівалентною схемою (рис. 2.3.5.б.), яку обчислити дуже просто: $R=2r+R'$, де



$R' = \frac{rR}{R+r}$, або підставивши значення для R' в попередню формулу, отримаємо: $R^2 - 2rR - 2r^2 = 0$, звідки $R = r(\sqrt{3} + 1)$.

Принцип симетрії можна також використовувати при

Рис. 2.3.5.а.

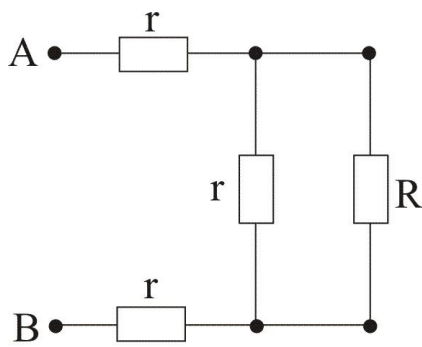


Рис. 2.3.5.б.

розрахунку ємності батарей конденсаторів. Але, слід відмітити, що використання принципу симетрії при розв’язуванні таких задач базується не лише на симетрії електричної системи, але й на тому, що заряд і різниця потенціалів на обкладках конденсатора зв’язані лінійною залежністю ($q=CU$).

Вчимо учнів аналізувати не тільки умову задачі, але й відповідь: якщо в умову задачі які-небудь параметри входять рівноправно, то й у відповідь ці параметри повинні входити симетрично. Інколи симетрію задачі можна виявити за структурою відповіді: коли досліджувана відповідь симетрична відносно однотипних параметрів, то треба перевірити, чи володіє такою властивістю умова задачі. Учням потрібно наголосити, що розв’язання кожної фізичної задачі потрібно починати із простих фізичних міркувань (симетрії, інваріантності, відносності, збереження).

2.4 Формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електромагнітної індукції та вихрового електричного поля

Вивченню явищ електромагнітної індукції (ЕМІ) у середній школі приділяється значна увага, оскільки вони лежать в основі багатьох виробничих та наукових застосувань. Окрім того зміст фундаментальних понять *вихрове електричне поле* та *електромагнітне поле* навряд чи може бути розкритий успішно поза детальним аналізом фізичної природи ЕМІ [247, с. 19-27]. У програму з фізики для профільних класів [172, с. 13] при вивченні електромагнітної індукції включено наступні питання:

Електромагнітна індукція. Досліди М.Фарадея. Напрямок індукційного струму. *Правило Ленца.* **Закон електромагнітної індукції.** Самоіндукція. ЕРС самоіндукції. *Індукційне електричне поле.* *Вихрові струми.* **Індуктивність.** **Енергія магнітного поля котушки зі струмом.**

Обертання прямокутної рамки в однорідному магнітному полі. **Змінний струм.** Одержання змінного струму. **Генератор змінного струму.** Діючі значення напруги і сили струму. *Конденсатор та індуктивна котушка в колі змінного струму.* *Активний, ємнісний та індуктивний опори.* *Закон Ома для електричного кола змінного струму.* *Резонанс напруг і струмів.* *Робота і потужність змінного струму.* **Трансформатор.** **Виробництво, передача та використання енергії електричного струму.** Взаємозв'язок електричного і магнітного полів як прояв єдиного електромагнітного поля.

Разом з тим, у підручниках фізики для середньої школи [55, с. 100-103; 149], які використовуються в даний час, присутні неточності, які перешкоджають правильному розумінню понять, згаданих вище. Більше того, вживані у них відповідні означення суперечать означенням, які використовуються у сучасній фізиці як науці [194, с. 264-275; 220, с. 50-55]. Ми пропонуємо підхід, який дозволяє уникнути цих недоліків, одночасно роблячи навчальний матеріал більш доступним учням.

Пристаючи до вивчення ЕМІ, варто у першу чергу увагу учнів звернути на те, що після відкриття електричного струму – впорядкованого руху електрично заряджених часточок або макроскопічних тіл розпочався пошук явища, аналогічного електростатичній індукції. Переслідувалась мета з допомогою постійного (стаціонарного) струму в одному провіднику збудити електричний струм в іншому подібно до збудження електричних зарядів на поверхні нейтрального провідника іншими нерухомими (стаціонарними) зарядами. У випадку успіху індукція розглядалася б як всезагальний зв'язок між зарядами [137, с. 316-317].

Однак М. Фарадей зумів прийняти до уваги ту роль, яку відіграє *середовище між зарядами і струмами*. Саме тому після відкриття у 1820 р. Х. К. Ерстедом дії електричного струму на магнітну стрілку – збудження електричним струмом МП на думку М. Фарадея був логічним пошук зворотного явища. Це дозволило йому у 1821 р. висловити надію «отримати електрику із звичайного магнетизму» [162, с. 222-235]. Останнє можна розглядати як постановку проблеми *збудження в провідниках електричних струмів під впливом МП*, незалежно від того, з чим зв'язані останні – струмами провідності чи молекулярними у природних магнітах, гіпотеза А. Ампера про існування яких М. Фарадею була відома.

Після усвідомлення учнями цієї пізнавальної проблеми доцільно провести відповідні демонстрації [105; 233; 162, с. 217-230], які відтворюють основні моменти пошуків М. Фарадея, звертаючи увагу учнів на наступне. Якщо провідний контур (замкнений провідник) перебуває у постійному (стаціонарному) МП, а ланки контуру нерухомі щодо цього МП, то при відсутності у контурі відомих учням джерел струму електричний струм у ньому не протікає. Якщо таке МП зв'язане із котушкою зі струмом, то напрошується очевидний висновок: явище, аналогічне електростатичній індукції, по відношенню до електричних струмів не спостерігається. Окрім того, хоч і електричний струм збуджує в оточуючому провідник середовищі МП, що схематично можна зобразити як $I \Rightarrow B$, однак у стаціонарному випадку

зворотній зв'язок $B \rightarrow I$ не спостерігається: постійне МП у провідному контурі, ланки якого нерухомі щодо МП, електричного струму не збуджує.

Разом з тим на основі демонстрацій учні повинні пересвідчитись, що під час перебування у МП провідного контуру, площина якого утворює з лініями магнітної індукції кут, відмінний від прямого (кут α між нормаллю \vec{n} до площини контуру і магнітною індукцією B не дорівнює $\pi/2$ або $3\pi/2$), у контурі збуджується електричний струм у наступних випадках:

1. модуль магнітної індукції незмінний в часі ($B = \text{const}$), однак відбувається *відносний рух* ланок контуру і МП, так що:

– при незмінній орієнтації контуру щодо МП ($\alpha = \text{const}$) він деформується (площа контуру $S \neq \text{const}$);

– при відсутності деформації контуру ($S = \text{const}$) змінюється його орієнтація щодо МП ($\alpha \neq \text{const}$);

– деформації та зміна орієнтації контуру щодо МП відбувається одночасно ($S \neq \text{const}$; $\alpha \neq \text{const}$);

2. ланки контуру і МП (джерело МП) перебувають у відносному спокої ($S = \text{const}$; $\alpha = \text{const}$), однак модуль магнітного поля змінюється ($B \neq \text{const}$).

Оскільки після вивчення механіки учні усвідомлюють спокій і рух як відносні, зміна напрямку B ($\Delta B \neq 0$, хоча $\Delta B = 0$) – поворот B щодо системи відліку (СВ), зв'язаної з контуром, інтуїтивно розглядається ними як зміна орієнтації контуру, його поворот ($\Delta \alpha \neq 0$) щодо СВ, зв'язаної з МП (джерелом МП). На правомірності застосування такого механічного підходу під час вивчення електромагнетизму детальніше ми зупинимося згодом.

Таким чином, електричний струм у провідному контурі, який перебуває в МП, збуджується лише у випадках нестационарності контуру (провідника) або МП. Розглядаючи МП як певне середовище, зв'язане з електричними струмами, робимо висновок, що електричний струм в одному провіднику здатний збудити струм у іншому лише тоді, коли він змінюється або ж змінюються орієнтація чи форма провідників. Останнє свідчить про необґрунтованість аналогії між

електростатичною індукцією та *сукупністю явищ*, відкритих М. Фарадеєм і названих ним *електромагнітною індукцією*. Ситуація нагадує пошуки у XIV ст. західного шляху із Європи до Індії, що привели до відкриття невідомого європейцям материка – Америки, який отримав спочатку назву Вест-Індія, аналогічну до назви мети пошуків. Результати експериментів М. Фарадея є фундаментальними хоч і мали в якості вихідного пункту гіпотетичну аналогію, яка у подальшому не підтвердилась [162, с. 217].

У розумінні М. Фарадея *ЕМІ – збудження електричного струму у провідному контурі*, який перебуває у МП, у випадках, перерахованих вище [194, с.264-270]. Ці випадки можна зобразити схематично: $\Delta\alpha \Rightarrow I$; $\Delta S \Rightarrow I$; $\Delta B \Rightarrow I$, або об'єднавши $\Delta\alpha, \Delta S, \Delta B \Rightarrow I$. Однак учням відомо, що струм у провідному контурі може існувати порівняно тривалий проміжок часу, достатній для реєстрування струму, за умови, що контур містить *джерело струму*, яке забезпечує протягом реєстрування наявність різниці потенціалів між довільними точками контуру. Як відомо, основними властивостями джерела струму є його *електрорушійна сила* (ЕРС) ε та *внутрішній опір* r , а природа джерела струму визначається природою *сторонніх сил* $\vec{F}_{\text{ст}}$, які діють у ньому. Таким чином, у явищах ЕМІ у контурі повинно діяти *джерело струму*, яке назвемо *індукційним*, а його ЕРС - *ЕРС індукції*, позначивши її ε_i , що дозволяє причинно-наслідковий зв'язок у цих явищах зобразити схематично $\Delta\alpha, \Delta S, \Delta B \Rightarrow \varepsilon_i \Rightarrow I$.

Враховуючи останнє, ставимо перед учнями наступні пізнавальні задачі:

- з'ясувати зв'язок ЕРС індукції ε_i зі змінами α, S, B ;
- з'ясувати природу сторонніх сил $F_{\vec{n}\partial}$, які діють у індукційному джерелі.

Розв'язування першої задачі доцільно провести на прикладі деформації контуру, який перебуває в однорідному постійному МП, застосувавши підхід, запропонований Г.Л. Гельмгольцем, який ґрунтується на законі збереження енергії [182 с. 182-185; 137, с. 315; 194, с. 266]. Нехай провідний контур – прямокутник, нормаль \vec{n} до площини якого утворює кут α із напрямком B і

деформація якого відбувається за рахунок руху ланки контуру KL зі швидкістю \vec{v} щодо CB , зв'язаної з джерелом МП (кут між \vec{v} і \vec{B} рівний $\beta = \pi/2 - \alpha$). Нехай у контурі присутнє джерело струму – гальванічний елемент з

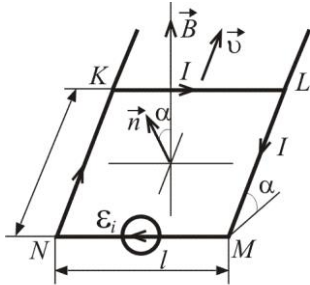


Рис.2.4.1.

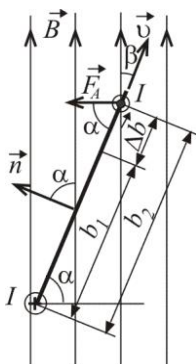
ЕРС ϵ_r , який забезпечує протікання струму із силою струму I у момент часу t , коли контур має розміри, вказані на рис. 2.4.1. і його повний електричний опір становить R . Впродовж малого проміжку часу Δt ланка KL здійснить переміщення $\Delta \vec{b} = \vec{v} \Delta t$ і від джерела буде спожита енергія $W = \epsilon_r I \Delta t$. Завдяки їй у контурі виділяється кількість тепла

$Q = I^2 R \Delta t$ та виконується силою Ампера механічна робота:

$$A_A = F_A \Delta b \cos(\pi - \alpha) = -F_A \Delta b \cos \alpha \quad (\text{рис. 2.4.2.}).$$

Оскільки тут напрям протікання струму перпендикулярний \vec{B} , то $F_A = BI$, так що

$$A_A = -BI \Delta b \cos \alpha = -BI(b_2 - b_1) \cos \alpha = -I(B \xi_2 \cos \alpha - B \xi_1 \cos \alpha) = -I(\hat{O}_2 - \hat{O}_1) = -I \Delta \hat{O}, \text{ де}$$



позначено $O = B \xi \cos \alpha$ — *потік магнітної індукції* або коротко *магнітний потік*. Даємо означення магнітного потоку і зауважуємо, що величина Φ побудована з величин α, S, B , зміна яких суттєва для спостереження ЕМІ. Окрім того, попутно отримано просте співвідношення для обрахунку механічної роботи сили Ампера ($A_A = -I \Delta \hat{O}$), яке зручно використовувати

Рис.2.4.2. для розв'язування задач. Зрозуміло, що якби контур складався з

N витків, тобто ланка KL була б повторена N разів, то механічна робота сили Ампера під час деформації контуру зростає також у N разів, так що магнітний потік у цьому випадку дорівнює: $O = NB \xi \cos \alpha$. Згідно з законом збереження енергії: $W = Q + A_A$, що із врахуванням конкретних значень W, Q та A_A дає: $\epsilon_r I \Delta t = I^2 R \Delta t - I \Delta \hat{O}$. Для сили струму в момент часу t отримуємо:

$$I = (\epsilon_r - \Delta \hat{O} / \Delta t) / R \quad (2.4.1).$$

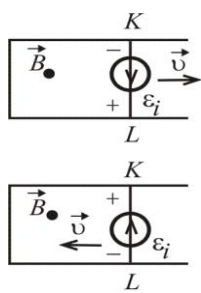
Порівнюючи це співвідношення із законом Ома для повного кола ($I = \epsilon / R$), учні роблять висновок, що у контурі поряд з гальванічним елементом

існує ще одне джерело струму, наявність якого зумовлена **деформацією контуру в постійному МП — індукційне джерело**. У даному випадку ($\Delta\Phi > 0$) його ЕРС: $\varepsilon_i = \Delta\dot{\Phi}/\Delta$. Якби ланка KL рухалась у протилежному напрямку ($\Delta\Phi < 0$), то ЕРС індукції становила б: $\varepsilon_i = -\Delta\dot{\Phi}/\Delta$. Тобто, незалежно від того, приводять деформації контуру до збільшення чи зменшення його площі: $\varepsilon_i = |\Delta\dot{\Phi}/\Delta|$. Окрім того, як видно із (2.4.1), у даному випадку ($\Delta S > 0$) **полярність індукційного джерела** така, що МП зумовленого ним струму (індукційний струм) протидіє наростанню магнітного потоку Φ , тоді як у випадку зміни напрямку \vec{D} на протилежний ($\Delta S < 0$) МП індукційного струму протидіє його спаданню.

Акцентуємо увагу учнів на тому, що два останніх твердження, як свідчать чисельні досліди, справедливі для довільних явищ ЕМІ. Перше з них відображає зміст **закону Фарадея для ЕМІ**: ЕРС індукції рівна модулю швидкості зміни потоку магнітної індукції поля, в якому перебуває контур (магнітного потоку, зчепленого з контуром). Друге стосується **правила Ленца**, згідно з яким індукційний струм у замкнутому контурі має такий напрям, що його магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, зчепленого з контуром. Однак, йому варто дати дещо інше формулювання в силу наступного.

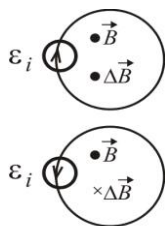
Оскільки ЕРС джерела індукції виявилась залежною не від B , S , α зокрема, а від Φ , яка їх об'єднує, то причинно-наслідковий зв'язок під час ЕМІ можна зобразити схематично: $\Delta\alpha, \Delta S; \Delta B \Rightarrow \Delta\Phi \Rightarrow \varepsilon_i \Rightarrow I$. Більше того, якщо контур розірвати, то електричний струм у ньому не протікатиме. Однак, ввімкнутий у розрив вольтметр з великим опором, наприклад, електростатичний, зафіксує деяку різницю потенціалів, рівну ε_i . Таким чином, під час змін Φ струм у провідному контурі (індукційний струм) реєструється не завжди, тоді як ЕРС індукції може бути виміряна у всіх випадках. Тому в якості ядра причинно-наслідкового зв'язку, який визначає протікання явищ ЕМІ, слід визнати наступний: $\Delta\Phi \Rightarrow \varepsilon_i$. Останнє є підставою для означення поняття ЕМІ, яке відрізняється від означення М. Фарадея, однак є більш строгим і більш

потужним у пізнавальному відношенні. **ЕМІ – збудження ЕРС (виникнення джерела струму) у провідному контурі внаслідок зміни магнітного потоку, зчепленого з ним, зумовленого механічним рухом ланок контуру або змінами магнітної індукції поля, у якому контур перебуває** [220; 194, с. 271-275]. Тоді правило Ленца: індукційне джерело струму має таку полярність, що магнітне поле електричного струму зумовленого ним у замкненому провідному контурі,



протидіє змінам магнітного потоку, зчепленого з контуром (рис. 2.4.3, рис. 2.4.4.). Останнє формально враховується введення знака «мінус» у співвідношення для закону М. Фарадея, що є цілком логічним наслідком співвідношення (2.4.1), отриманого вище: $\mathcal{E}_i = -\Delta\Phi/\Delta t$.

Рис.2.4.3. На цьому етапі доцільно провести демонстрації, які підтверджують справедливість правила Ленца [105; 233; 162, с. 229-232], а також дати означення одиниць магнітного потоку Φ та магнітної індукції B .



Розв’язування другої пізнавальної задачі — з’ясування природи сторонніх сил, які діють у індукційному джерелі струму, розпочинаємо з розгляду ЕМІ, зумовленої механічним рухом прямолінійного металевого провідника KL завдовжки l , швидкість \vec{v}

Рис.2.4.4. якого утворює кут β з B (рис. 2.4.1). Звертаємо увагу на те, що разом із провідником всі електрони провідності e^- рухаються зі швидкістю \vec{v} щодо МП (тепловим рухом e^- нехтуємо). Тому на кожен з них діє **магнітна сила** F_m , для якої, як показав Г. Лоренц $F_i = e v B \sin\beta$. Вона зумовлює впорядкований рух електронів провідності вздовж провідника від L до K , внаслідок чого поблизу K накопичується некомпенсований негативний заряд, а поблизу L – позитивний.

Якщо провідник KL зробити ланкою провідного контуру (рис. 2.4.1.), то по відношенню до нього він відіграватиме роль джерела струму — індукційного джерела, оскільки у ньому магнітні сили здійснюють перерозподіл зарядів, забезпечуючи незмінність різниці потенціалів між точками K і L . Таким чином, в якості сторонніх сил, які діють в індукційному

джерелі, породженими механічним рухом ланок контуру щодо МП (деформації або зміна орієнтації контуру), слід розглядати магнітні сили. Якщо останнє вірне (сторонні сили іншої природи відсутні), то із цієї гіпотези ми повинні теоретично отримати те ж співвідношення для ε_i , яке дослідно обґрунтував М. Фарадей [162, с. 217-219].

Дійсно, ЕРС джерела дорівнює $\varepsilon = A/q$, де A — механічна робота сторонніх сил по перенесенню заряду q ($q > 0$) по електричному колу — замкненому контуру. Оскільки у даному випадку (рис. 2.4.1.) сторонні сили діють лише на ділянці KL завдовжки l , то їх механічна робота по переміщенню заряду $q = e$ по замкненому контуру рівна: $A = A_i = F_i l = e v B \sin \beta$, так що $\varepsilon_i = \varepsilon = v B \sin \beta$. Враховуючи що $\beta = \pi/2 - \alpha$ та $v = \Delta b / \Delta t$, отримуємо $\varepsilon_i = (\Delta b / \Delta t) B \sin(\pi/2 - \alpha) = (\Delta(b l) / \Delta t) B \cos \alpha = B(\Delta S / \Delta t) \cos \alpha = (B \Delta S \cos \alpha) / \Delta t = \Delta(B S \cos \alpha) / \Delta t = \Delta \dot{O} / \Delta t$. Таким чином, гіпотеза про магнітну природу сторонніх сил у випадку механічного руху провідників у постійних МП вірна ($v \Rightarrow F_i \Rightarrow \varepsilon_i$), а ЕРС індукції може бути знайдена згідно з співвідношенням: $\varepsilon_i = v B \sin \beta$. Індукційне джерело струму виявляється розподіленим у рухомому провіднику (сторонні сили діють у кожній точці рухомого провідника), а його полярність (напрямок $F_{\vec{n}_0}$) визначається так, як напрямок F_i , тобто згідно з правилом правої (лівої) руки. Зауважимо, що тут скористуватись правилом Ленца у формі, приведений в [59; 149] ми не можемо, оскільки провідник не є ланкою контуру і індукційний струм відсутній.

Для з'ясування природи сторонніх у випадку контуру, ланки якого нерухомі щодо МП ($\Delta \alpha = 0$, $\Delta S = 0$), модуль магнітною індукції якого з часом змінюється ($\Delta B \neq 0$), розглядаємо наступну комп'ютерну модель (мисленний дослід). Нехай тонке металеве кільце радіусом r з вузьким розрізом перебуває в МП, магнітна індукція якого B перпендикулярна площині кільця і модуль якої наростає зі швидкістю $\Delta B / \Delta t$ ($\Delta B / \Delta t > 0$). До кінців розрізу приєднаємо високоомний вольтметр. Оскільки $\Delta B \neq 0$, то, як відомо із дослідів М. Фарадея, у контурі існує індукційне джерело, полярність якого і напрямок дії сторонніх сил $F_{\vec{n}_0}$ у якому

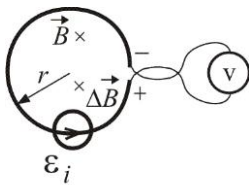


Рис.2.4.5.

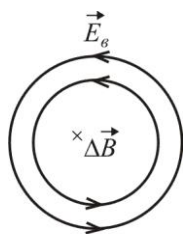
можуть бути знайдені згідно з правилом Е. Х. Ленца (рис. 2.4.5.). Оскільки всі точки джерела знаходяться в однакових умовах щодо МП, то в кожній з них повинні діяти однакові сторонні сили: індукційне джерело розподілене вздовж всього кільця, а вольтметр реєструє напругу (різницю потенціалів), яка дорівнює ЕРС. Згідно із законом Фарадея вона рівна: $U = \varepsilon_i = \Delta\hat{O}/\Delta t = \Delta(B S \cos\alpha)/\Delta t = \pi r^2(\Delta B/\Delta t)$, оскільки $\alpha=0$, а $S = \pi r^2$. У свою чергу, наявність напруги на провіднику свідчить про існування у ньому ЕП. При необмеженому зменшенні ширини розриву кільця лінія напруженості цього поля (кільце тонке) повинна була б стати замкненою, тобто колом, яке співпадає із кільцем. В такому випадку напруженість ЕП у кільці:

$$E = U/l = (r/2)(\Delta B/\Delta t) \quad (2.4.2).$$

Підводимо учнів до принципово важливого висновку, який поки що має характер гіпотези, честь формулювання якого належить Д. К. Максвеллу [194, с. 272]: **змінне магнітне поле породжує вихрове електричне поле**. Наявність провідного контуру в області, де з часом відбуваються зміни B за модулем або напрямком, несуттєва: протікання електричного струму у цьому контурі, точніше існування у ньому індукційного джерела струму, лише свідчить про збудження в цій області ЕП із замкненими лініями напруженості. Усунення цього контуру з МП на вихрове ЕП не впливає, хоч і втрачається можливість його реєстрації. Наголошуємо, що справедливність гіпотези Максвелла була підтверджена численними дослідженнями, а явища, передбачені на її основі, застосовуються у багатьох технологіях. Таким чином, внесення провідного контуру в змінне МП зумовлює дію в ньому сторонніх сил, електричних за своєю природою. Якщо позначити напруженість вихрового ЕП E_v , то ЕМІ у даному випадку може бути зображена схематично: $\Delta B \Rightarrow E_v \Rightarrow F_e \Rightarrow \varepsilon$. Що стосується сторонніх сил, то для них: $F_{nd} = eE_v = e(r/2)(\Delta B/\Delta t)$.

Зв'язок змінного магнітного та вихрового ЕП є фундаментальним, а рівняння, отримане Максвеллом для зв'язку E_v та $\Delta B/\Delta t$ більш загальним, ніж

рівняння закону Фарадея для ЕМІ, яке визначає зв'язок ε_3 та $\Delta\vec{O}/\Delta t$.
 Приймаючи до уваги недостатню математичну підготовку учнів, запис відповідного рівняння Максвелла не проводимо, внаслідок чого втрачаються можливості обрахунку $E_{\dot{a}}$. Однак, повертаючись до (рис. 2.4.5.) відмічаємо, що лінії напруженості вихрового ЕП лежать у площині, перпендикулярній



напрямку зміни ΔB , а напрямок $E_{\dot{a}}$ у кожній точці може бути встановлений аналогічно до визначення полярності індукційного джерела (напрямку $F_{\dot{n}o}$) згідно з правилом Ленца: **якщо відставлений великий палець лівої руки співпадає з напрямком ΔB , то інші зігнуті пальці показують напрямок $E_{\dot{a}}$** (рис. 2.4.6.). Тут

Рис.2.4.6.

варто зупинитись на порівняльній характеристиці **електростатичного** та **вихрового електричного** полів, яку подаємо у формі наступної таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика електростатичного та вихрового ЕП

Електростатичне поле	Вихрове електричне поле
Зв'язане з нерухомими (стаціонарними) зарядами	Зв'язане зі змінним (нестационарним) МП
Лінії напруженості незамкнені і мають початок на q^+ і кінець на q^-	Лінії напруженості замкнені (вихрові); напрямок $E_{\dot{a}}$ – правило лівої руки
Потенціальне	Непотенціальне

Завершуючи розгляд ЕМІ, звертаємо увагу учнів на те, що хоч і ЕРС індукції у провідних контурах в усіх випадках підлягає одному і тому ж закону – закону Фарадея, однак природа відповідних явищ може бути різною, оскільки сторонні сили можуть мати різну природу — магнітну або електричну (рис. 2.4.7.).

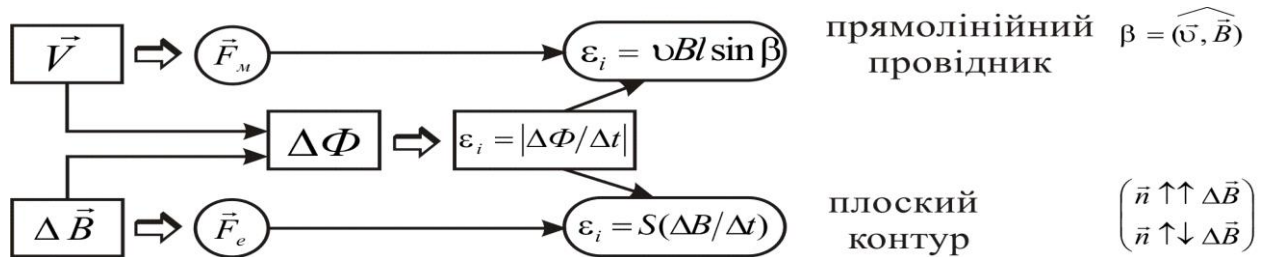


Рис.2.4.7.

Тут варто повернутися до випадку, згаданого раніше. Нехай СВ зв'язана з контуром, що перебуває у полі, магнітна індукція якого по відношенню до цієї СВ змінюється лише за напрямком ($\Delta B \neq 0$, хоча $\Delta V = 0$). У такій СВ сторонні сили, що діють у контурі, мають електричну природу, оскільки зумовлені наявністю вихрового ЕП в області зміни магнітної індукції B . Розглянемо явище у СВ, зв'язаній з МП (джерелом МП). По відношенню до цієї СВ магнітна індукція $B = \text{const}$. Тобто відбувається зміна орієнтації контуру щодо постійного МП. Таким чином, у даній СВ сторонні сили, які діють у контурі, мають магнітну природу, оскільки зумовлені перерозподілом зарядів у провіднику, що рухається в МП. Суперечність у поясненні природи ЕМІ у даному випадку вимагає додаткового аналізу, який доцільно провести під час формування поняття *електромагнітне поле (ЕМП)*.

Учні повинні усвідомити, що індукційна ЕРС у всіх випадках зумовлена сторонніми силами, електромагнітними за природою, тобто ($F_{\text{нд}} = F_i + F_e$). Останнє пояснюється тим, що як фізична реальність існує лише ЕМП, тоді як окремий розгляд електричного (ЕП) або магнітного (МП) полів можливий лише у зв'язку із вибором тієї чи іншої СВ. Це дозволяє ще раз відзначити відмінність у розумінні ЕМІ Фарадеєм і Максвеллом. Коли з точки зору першого ЕМІ полягає у збудженні електричного струму у провідному замкнутому контурі у випадках, перерахованих вище, то другий бачить сутність ЕМІ у збудженні в довільному середовищі (не обов'язково провідному) змінним МП вихрового ЕП. Саме цим пояснюється універсальність закону ЕМІ Фарадея і саме цієї точки зору притримується сучасна фізика [162; 194; 220].

2.5 Формування понять симетрії, невизначеності, відносності при вивченні електричних струмів в різних середовищах

У програму з фізики для профільних класів [172, с. 10] при вивченні електричних струмів у різних середовищах включено наступні питання:

Електричний струм у різних середовищах. *Електричний струм в металах. Електронна провідність металів. Питомий опір провідників та його залежність від температури. Уявлення про надпровідність. Електричний струм в рідинах. Закони електролізу. Електрохімічний еквівалент. Застосування електролізу в техніці. Електричний струм в газах. Несамостійний та самостійний розряд. Типи самостійного розряду та їх технічне використання. Плазма та її властивості. Практичне застосування плазми. **Електропровідність напівпровідників та її види. Власна і домішкова провідності напівпровідників.** Електронно-дірковий перехід: його властивості і застосування. **Напівпровідниковий діод. Транзистор. Напівпровідникові прилади та їх застосування.** Струм у вакуумі та його застосування. *Термоелектронна емісія. Електронні пучки та їх властивості. Електронно-променева трубка. Термоелектричні явища. Контактна різниця потенціалів. Термоелектрорушійна сила. Термопара. Застосування термоелектричних явищ у науці і техніці.**

В темі “Електричний струм у різних середовищах” механізм провідності розкривається на основі класичної електронної теорії, яка не може повністю пояснити його. У [120] було розглянуто один із можливих підходів до вдосконалення методики вивчення провідності металів. Його застосування сприяє не лише формуванню основ класичної електронної теорії, а й створює передумови для якісного засвоєння учнями основ квантової теорії провідності.

На нашу думку, у профільних класах вивчення даної теми доцільно будувати на основі ФФП *симетрії, невизначеності, відносності* [18, с. 40-51; 111]. Це дозволить не лише структурувати навчальний матеріал теми, але і пояснити його з точки зору сучасної фізики [162, с. 20-28; 194, с. 435-467] та виробити єдиний підхід до його вивчення. Внаслідок виникають можливості глибшого і аргументованішого вивчення у подальшому фізики мікросвіту. Школярі повинні розуміти фізику відповідних процесів, що ґрунтується, в кінцевому випадку, на ідеях квантової фізики, а також теорії відносності. Представляється доцільним такий “ланцюг”: ФФП → спеціальні питання

сучасної фізики → їх практичне застосування і розвиток сучасної техніки.

Зупинимось на основних моментах підходу, який ми пропонуємо.

Для вияснення природи носіїв струму у металах розказуємо учням фундаментальні досліді Рікке, Мандельштама і Папалескі, Талмена і Стюарта [182, с. 227-229]. Встановивши з учнями основні положення класичної електронної теорії [59], вказуємо труднощі, з якими стикнулася теорія Друде-Лоренца у поясненні провідності металів (із пониженням температури провідність чистих металів збільшується, пояснення теплоємності електронного газу, явище надпровідності) [182, с. 233].

Учням підкреслюємо, що сам факт існування твердих тіл свідчить про наявність сил, які утримують електрони всередині твердого тіла. Щоб добути з нього електрон необхідно затратити деяку роботу проти сил, які утримують електрони всередині твердого тіла. Уявимо собі, що тверде тіло разом із оточуючим його простором поміщене в адіабатичну оболонку і підтримується при постійній температурі T . Тоді внаслідок теплового руху і розподілу електронів за швидкостями всередині тіла знайдуться електрони, кінетична енергія яких достатня для подолання сил, які утримують їх всередині тіла, і виходу за його границі. Завдяки цьому у поверхні тіла утворюється “газ” із електронів. Електрони цього “газу” при своєму русі наближаються до поверхні твердого тіла і захоплюються всередину нього. Термодинамічна рівновага досягається тоді, коли кількість електронів, які покидають поверхню тіла в середньому дорівнює кількості електронів, які поступають в об’єм тіла із шару електронного “газу”, що прилягає до його поверхні.

Але всередині твердого тіла електрони мають різні енергії. Учням підкреслюємо, що закони руху мікрочастинок описуються квантовою механікою, яка на відміну від класичної приймає до уваги, що частинка або система частинок, яка здійснює фінітний рух в заданому силовому полі, може знаходитися лише у визначеннях квантових станах, яким відповідають визначені значення енергії. Ці значення називаються енергетичними рівнями системи. Показуємо учням дозволені значення енергії для трьох випадків: а)

електрон у атомі; б) електрон у кристалі; в) вільний електрон (рис. 2.5.1).

Ставимо перед учнями наступну пізнавальну задачу: чому одні тіла є провідниками, а інші напівпровідниками і ізоляторами? Розв'язати цю задачу не виходячи за межі класичної моделі газу вільних електронів не можна. Актуалізуємо знання учнів із курсу шкільної хімії про електронні оболонки.

Підсумовуючи знання учнів про електронні оболонки, відмічаємо, що закони руху мікрочастинок описуються квантовою механікою, яка дозволяє обчислити спектр енергій електронів на електронних оболонках, якщо відомий закон зміни їх потенціальної енергії. При цьому до уваги необхідно приймати також і взаємодію електронів між собою.

Оскільки експериментально енергетичний спектр електронів у твердих тілах досліджений достатньо детально, то констатуємо, що спектр існує і є дискретним. У кожному квантовому стані може знаходитися лише один електрон (принцип Паулі). Виконання принципу Паулі означає, що навіть між вільними електронами існує взаємодія, яка носить квантовий ефект. Звертаємо увагу на те, що енергетичні рівні електрона в атомі зображені на рис. 2.5.1, а трохи “розмиті”.

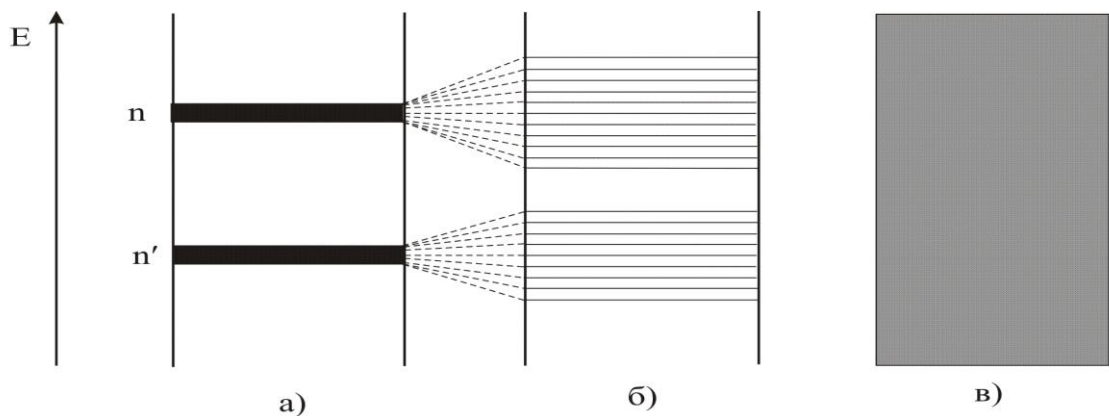


Рис. 2.5.1. Значення енергії електрона (спектр) у атомі (а), кристалі (б), вільний електрон (в).

Після розгляду енергетичних спектрів електронів у атомах відмічаємо, що коли атоми складають кристалічну решітку твердого тіла, то ситуація змінюється. Саме існування кристалічної решітки свідчить про те, що між атомами існує взаємодія, яка і обумовлює виникнення решітки. Тому атоми не можна вже вважати ізольованими, а потрібно всю кристалічну решітку

розглядати як єдину систему і говорити про енергетичні рівні цієї системи. Виявляється, що енергетичний спектр кристалічної решітки зв'язаний з енергетичним спектром ізольованих атомів простим співвідношенням: в результаті взаємодій між атомами кожен із енергетичних рівнів $n=1, 2, \dots$ розщеплюється на велику кількість дуже близько розміщених між собою підрівнів, на яких в стані розмістяться всі електрони, що знаходились спочатку на відповідному рівні ізольованих атомів. Сукупність близько розміщених енергетичних рівнів, що утворились в результаті розщеплення деякого енергетичного рівня ізольованого атому, називається енергетичною зоною або просто зоною (схема утворення зон ображена на (рис. 2.5.1 а, б)).

Всередині зон відстань між різними рівнями мала. Відстань між різними зонами залишається значною, по порядку величини рівною відстані між енергетичними рівнями ізольованих атомів. Проміжки між енергетичними зонами, які не можуть займатися електронами, називаються забороненими зонами, оскільки в них електрони не можуть знаходитися [137, с. 23].

Як відомо, основним станом твердого тіла є стан із найменшою енергією. Тому при температурі 0°K повинні бути заповнені послідовно без проміжків всі квантові стани електронів, починаючи із рівня із найменшою енергією. Внаслідок скінченного числа електронів є скінченний заповнений рівень з найбільшою енергією, а всі наступні рівні вільні. Отже, при 0°K , ця границя розмивається, оскільки в результаті теплового руху у деяких електронів енергія виявляється більше граничної енергії при $T=0^\circ \text{K}$, а деяких – менше. Отже, деякі рівні енергії, які були при $T=0^\circ \text{K}$ вільними, стануть заповненими, а які були заповненими – вільними. Ширина перехідної області від практично повністю заповнених до практично повністю вільних енергетичних рівнів має порядок kT . Термоелектронна робота виходу Φ із (2.5.1) зв'язана з енергією μ рівня Фермі співвідношенням:

$$\Phi = E_0 - \mu, \quad (2.5.2),$$

де E_0 – енергія електрона, що перебуває в спокої поза провідником у вакуумі. Для металів поняття про енергію Фермі дуже наглядні. В цьому випадку енергія

Фермі є енергією електронів на рівні, який заповнений при $T=0$ К і вище якого рівні вільні.

Для діелектриків енергія Фермі приходить на середину забороненої зони, що лежить вище останньої, повністю заповненої зони, а на цьому рівні електрон не може знаходитися, тобто, енергія Фермі не відповідає енергії якого-небудь реального електрона в діелектрику [137, с. 24-25].

Отже, Φ дорівнює роботі переміщення електрона із рівня Фермі за межі твердого тіла. Для металів це твердження має буквальний зміст, а для діелектриків дещо умовний, оскільки на рівні Фермі немає реальних електронів. Однак в обох випадках – це є робота для добування електрона із твердого тіла, проведена проти сил, що утримують електрони у твердому тілі. На основі цих міркувань можна стверджувати, що електрони всередині твердого тіла знаходяться у потенціальній ямі глибиною Φ . Вид потенціальних ям для металів (а) і діелектриків (б) показаний на (рис. 2.5.2).

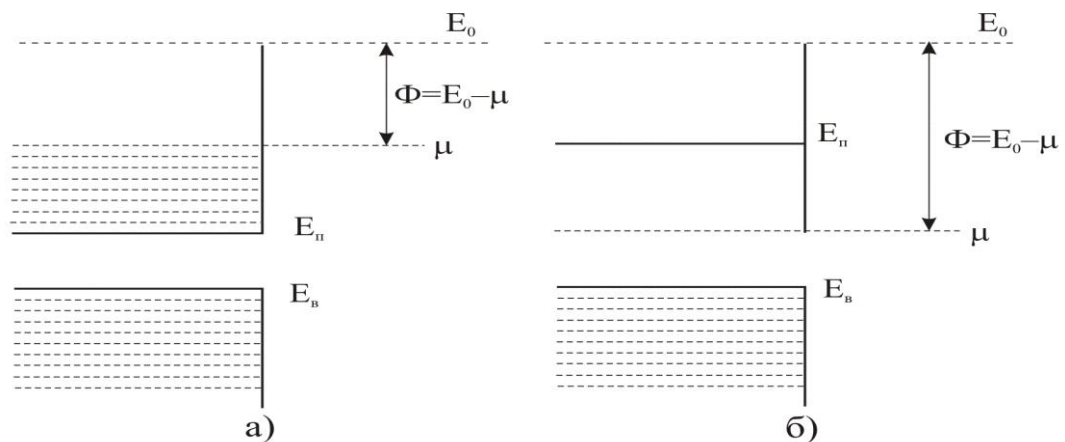


Рис. 2.5.2. Потенціальна яма для електрона в металі (а) і діелектрику (б).

Проміжок між рівнями E_n – провідності і E_v – валентності є забороненою зоною. Характер заповнення зон дозволяє пояснити учням, чому діелектрики не проводять електричний струм, а метали, навпаки, проводять.

Із (рис. 2.5.2). видно, що у діелектрика валентна зона повністю заповнена, а зона провідності повністю вільна. Цим і пояснюються діелектричні властивості матеріалу. Нехай до нього прикладено напругу. Щоб при цьому виник електричний струм, необхідно, по – перше, наявність електронів у зоні, і, по – друге, можливість для цих електронів збільшити свою енергію (під дією

прикладеної напруги). В зоні провідності в даному випадку електронів немає. Валентна ж зона заповнена електронами повністю, тому тут електрони не можуть зміститися вгору, адже всі “рівні” в зоні зайняті. Електрони у валентній зоні можуть лише обмінюватися один з одним місцями (енергією), але не можуть взяти енергію від прикладеного зовнішнього ЕП. Вони перебувають у тепловому русі, але не можуть впорядковано переміщатися під дією поля.

Для металів (рис. 2.5.2) у зоні провідності є і електрони і вільні місця. Тому у даному випадку електрони можуть бути носіями електричного струму. На основі енергетичного спектру електронів вводимо поняття про контактну різницю потенціалів, що дасть змогу пояснити учням явище електризації тіл на основі сучасних фізичних теорій.

Оскільки на електронний газ поблизу поверхні тіла діють електричні сили, що намагаються захопити електрони всередину тіла, то при наближенні поверхонь двох тіл настільки, щоб у проміжку між ними відбулось перекриття шарів електронного газу, тіла починають обмінюватися електронами.

Оскільки сили, що захоплюють електрон в тіло, більші у тіла, що має більшу роботу виходу, то після наближення поверхонь почнеться перехід електронів від тіла з меншою роботою виходу до тіла з більшою роботою виходу, в результаті чого перше тіло буде заряджатися додатно, а друге від’ємно. Виникаюче внаслідок цього ЕП між поверхнями тіл протидіє руху електронів, а результаті якого воно виникло. Напруженість цього поля досягає визначеного значення і подальший перехід електронів від одного тіла до іншого припиняється та встановлюється рівновага. Поверхні виявляються зарядженими протилежними за знаком але рівними за абсолютним значенням зарядами. Між поверхнями, як між обкладками конденсатора, встановлюється контактна різниця потенціалів,.

Наводимо схеми утворення контактної різниці потенціалів між двома металами, між металом і діелектриком, та між двома діелектриками (рис. 2.5.3) [137, с. 27]. Підкреслюємо відмінність в утворенні контактної різниці

потенціалів між металами і між металом і діелектриком: ЕП не проникає всередину металу, але проникає на невелику глибину у діелектрику (на рис. 2.5.3 глибина проникнення позначена d_1 і d_2). Тому у діелектриків падіння потенціалу відбувається не тільки між поверхнями, але і частково у тонкому шарі всередині діелектрика поблизу його поверхні.

Як видно із рис. 2.5.3, різниця між енергіями верхніх точок дорівнює $\Phi_2 - \Phi_1$ і тому контактна різниця потенціалів між поверхнями тіл, що перебувають в електронній рівновазі, задається формулою

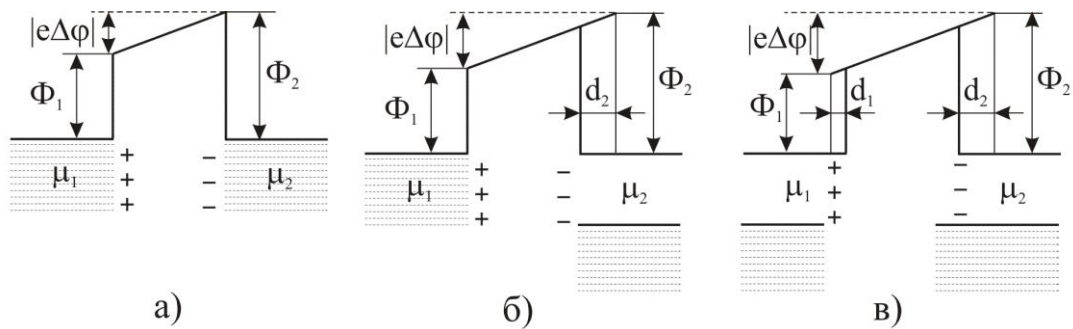


Рис. 2.5.3. Утворення контактної різниці потенціалів в проміжку між поверхнями метал-метал (а), метал-діелектрик (б), діелектрик-діелектрик (в).

$$|\Delta\phi| = |\hat{Q}_2 - \hat{Q}_1| / e. \quad (2.5.4)$$

Відмічаємо, що потенціал зменшується в напрямку від додатно заряджених тіл до від'ємно заряджених. Тому зміна потенціалу протилежна зміні потенціальної енергії електрона, тобто потенціал зменшується від першого тіла до другого.

На основі контактної різниці потенціалів пояснюємо учням процес електризації тіл. Підкреслюємо, що при розведенні плоских поверхонь провідників заряди на них можуть переміщатися по поверхні. Якщо одні ділянки поверхні розвести раніше інших, то на них, так як і у конденсаторі, при тій же різниці потенціалів густина заряду зменшиться. В результаті між тілами здійснюється обмін зарядами для відновлення електронної рівноваги, причому він відбувається через обмін електронами електронного газу на даній ділянці поверхні і внаслідок руху зарядів по поверхні на інших ділянках. В результаті заряд зберігається лише на тих ділянках поверхні, які ще знаходяться в

електронному контакті. Накінець настає момент, коли електронний контакт зберігається на надзвичайно малій площі поверхні, яка містить дуже малий заряд. Тому при остаточному розведенні провідників на них не залишається зарядів [137, с. 27].

Пропонуємо учням проаналізувати результат розведення діелектриків. Оскільки у діелектриків заряди не можуть переміщатися вздовж поверхні, то при розведенні ділянок поверхні різниця потенціалів між ними не залишається постійною, а збільшується так само, як збільшується різниця потенціалів між обкладками конденсатора, коли заряд обкладок постійний, а відстань між ними збільшується. Після втрати електронного контакту через електронний газ на ділянках поверхні зберігаються поверхневі заряди. В результаті повного розведення поверхонь діелектриків вони виявляються носіями різнойменних, рівних за абсолютною величиною, зарядів. Цей процес називається електризацією.

Для досягнення більш тісного зближення поверхонь діелектриків і утворення контактної різниці потенціалів тіла труть одне до одного і говорять про електризацію тертям. Але тертя при цьому ніякого відношення до електризації не має. Термінологія встановилась раніше, ніж була виявлена фізична природа явища.

На основі зонної теорії, що базується аналізі енергетичного спектра електронів, пояснюємо проходження електричного струму у напівпровідниках і домішкової електропровідності напівпровідників.

У напівпровідниках ширина забороненої зони мала. Тому енергія для переходів електронів із валентної зони в зону провідності береться за рахунок внутрішньої енергії кристалу. Учні повинні добре зрозуміти, що перехід електрона із валентної зони в зону провідності приводить до виникнення зразу двох носіїв струму – електрона в зоні провідності і додатно зарядженої дірки у валентній зоні. Пояснюємо, що у напівпровіднику поряд із переходами знизу вгору відбуваються також зворотні переходи: відбувається рекомбінація електрона провідності і дірки. В результаті при даній температурі кристалу

встановлюється динамічна рівновага: кількість переходів за одиницю часу знизу вверху зрівноважується із кількістю переходів зверху вниз, тому в кожній зоні буде весь час зберігатися постійна кількість носіїв струму. Даний підхід дозволяє пояснити учням залежність електропровідності напівпровідників від температури.

Учням вказуємо, що домішки обумовлюють появу в межах забороненої зони одного або більше домішкових енергетичних рівнів. Електрон у домішковому атомі локалізований в межах атома, тому і виникає додатковий рівень. Якщо домішкові атоми мають на зовнішній оболонці на електрон більше, ніж основні, то домішковий рівень знаходиться трохи нижче зони провідності (рис. 2.5.4.а). Але вже при невеликих температурах електрони з

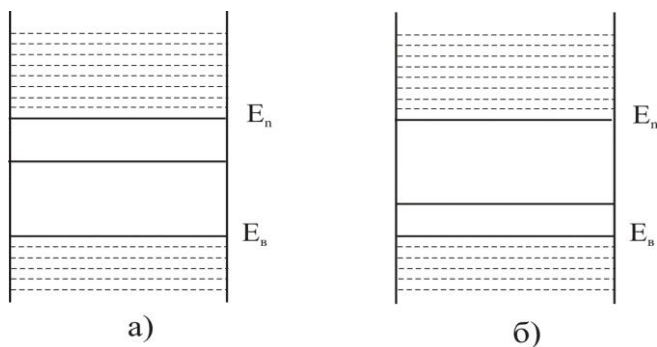


Рис.2.5.4.

цього рівня переходять у зону провідності (при цьому ніяких дірок у валентній зоні не утворюється).

Домішковий рівень виступає тут у ролі донора – він постачає електронами зону провідності (наприклад, миш'як у кристалі германію). Такі напівпровідники

називаються донорними.

У випадку (рис. 2.5.4.б) домішковий рівень знаходиться трохи вище від валентної зони; він утворюється у напівпровідниках із домішковими атомами, що мають на зовнішній оболонці на один електрон менше, ніж основні атоми. Вже при температурах порядку 10° К електрони валентної зони переходять на домішковий рівень, тобто захоплюються домішковими атомами, при цьому в зоні появляються дірки. Домішковий рівень виступає тут в якості акцептора (загарбника) – він захоплює електрони із валентної зони (наприклад тривалентний бор у кристалі германію).

Підсумовуючи сказане, підкреслюємо, що при переходах донорний рівень – зона провідності виникають тільки від'ємно заряджені носії струму –

електрони провідності, а при переходах валентна зона – акцепторний рівень – тільки додатно заряджені носії – дірки. При міжзонних переходах і ті і інші виникають в однаковій кількості. В результаті в донорних напівпровідниках завжди більше електронів провідності, ніж дірок (напівпровідники n-типу), а в акцепторних – навпаки (напівпровідники p-типу).

Використання зонної теорії при вивченні електронно-діркового переходу (p-n-переходу) дозволяє не тільки висвітлити дане питання з точки зору сучасної фізики, а й на основі розгляду енергетичних зон спростити і зробити наочнішим вивчення даного питання. При утворенні p-n-переходу електрони провідності із n-напівпровідника починають переходити у p-напівпровідник; в протилежному напрямку відбувається рух дірок. В результаті n-напівпровідник заряджається позитивно, а p-напівпровідник – негативно [194, с. 455-458].

Між напівпровідниками виникає різниця потенціалів U_k , що створює енергетичний поріг висотою $E_k = eU_k$, де e – заряд електрона (дірки). Цей поріг протидіє подальшому не скомпенсованому переходу електронів у p-напівпровідник і дірок у n-напівпровідник. Рисунок 2.5.5. а) ілюструє розглядуваний випадок: тут зліва енергетичні зони p-напівпровідника, а справа – n-напівпровідника, d – товщина приконтактного шару, а межах якого зосереджується об'ємний заряд (позитивний – справа від лінії контакту AA і від'ємний – зліва від неї).

Якщо до p-n-переходу прикладена наруга U у прямому напрямку, то в цьому випадку висота енергетичного порогу зменшиться – вона стане рівною $E_k - eU$ (рис. 2.5.5.б), тому через перехід потече струм. Якщо ж до p-n-переходу

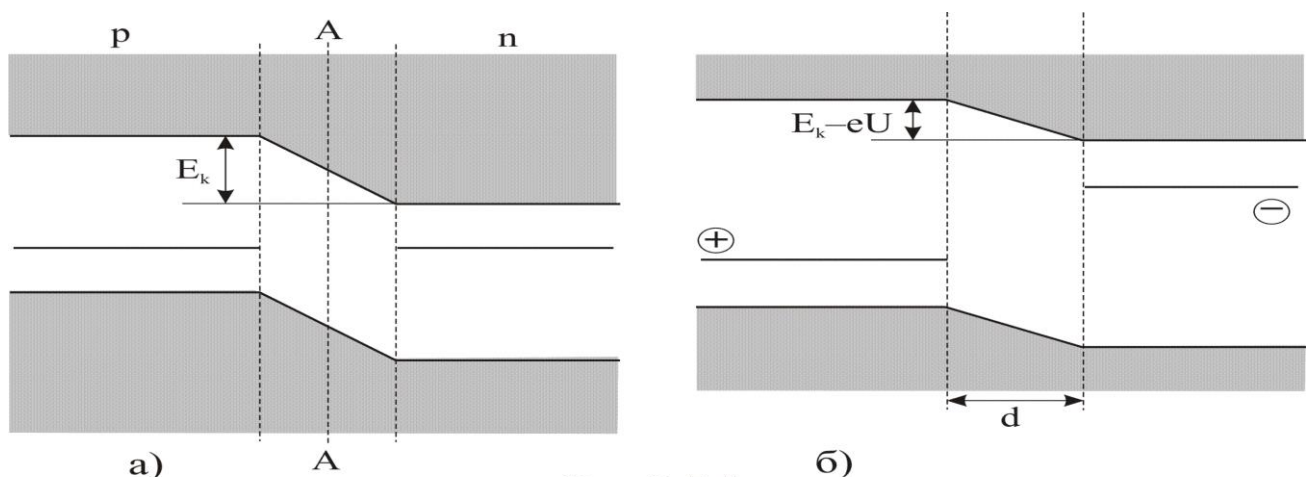


Рис.2.5.5.

прикласти напругу в оберненому напрямку, то поріг, навпаки, зросте і стане рівним $E_k + eU$ і струм через обернений перехід не буде проходити.

На основі проведених вище міркувань пояснюємо учням фізику транзистора. Як показує практика, такий підхід до висвітлення провідності напівпровідників дозволяє не тільки систематизувати вивчення даного питання на основі квантових уявлень та ФФП але і поглибити розуміння фізичних процесів, що відбуваються у напівпровідниках на основі сучасних фізичних поглядів.

На основі аналізу енергетичних спектрів електронів у металі вивчаємо явище термоелектронної емісії [194] та його практичне застосування.

При вивченні електричного струму у електролітах, основну увагу приділяємо вивченню закону Фарадея та виведення формули для визначення заряду одновалентного іона. Даний матеріал тісно зв'язаний із курсом хімії (природа носіїв струму у електролітах, електролітична дисоціація). Учням обов'язково підкреслюємо той факт, що із аналізу законів електролізу випливає дискретність зарядів, які мають іони у електролітах.

При вивченні електропровідності газів наголошуємо, що для того, щоб газ став провідником, необхідно наявність якого-небудь стороннього фактору іонізації (висока температура газу, ультрафіолетове випромінювання). Однак при достатньо великій напруженості ЕП іонізація газу виникає в результаті дії поля. Виникаючий при цьому струм називається самостійним, а у випадку сторонніх факторів іонізації-несамостійним [182, с. 236].

Перш, ніж приступити до вивчення різних видів самостійного розряду, розглядаємо основні процеси, що приводять до виникнення носіїв струму (електронів і іонів) при подібних розрядах [182, с. 244].

Учням відмічаємо, що зіткнення електронів (а також іонів) з молекулами можуть мати пружний і непружний характер. Енергія молекули, як і атома, квантується – тобто може приймати лише дискретні значення. Стан із найменшою енергією називається основним. Для того, щоб перевести молекулу із основного в збуджені стани, треба визначенні значення енергії W_1 , W_2 і т.д.

Надавши молекулі достатньо велику енергію W_i , можна викликати її іонізацію.

Перейшовши у збуджений стан, молекула здебільшого перебуває у ньому всього лише $\sim 10^{-8}$ с, після чого переходить у основний стан, випромінюючи надлишок енергії у виді кванту світла – фотона.

Однак навіть якщо енергія вдаряючої частинки (електрона) достатньо велика, зіткнення не обов'язково приводить до збудження або іонізації молекули. Існують певні ймовірності цих процесів, які залежать від енергії (а отже і від швидкості) електрона. На (рис. 2.5.6) показаний приблизний хід цих

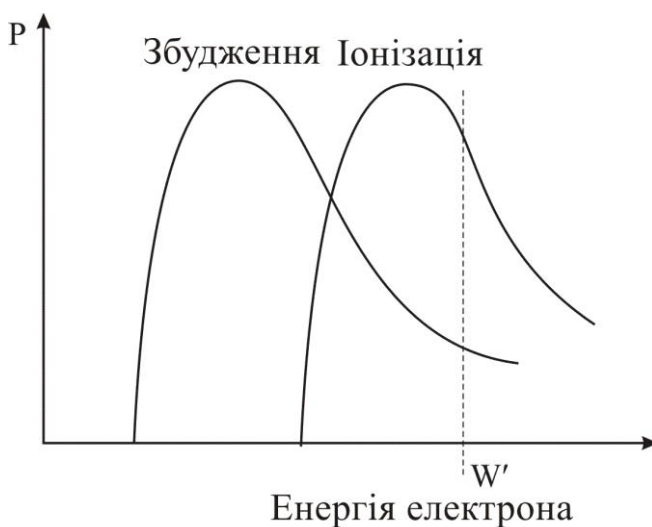


Рис.2.5.6.

ймовірностей. Чим швидше летить електрон, тим менший проміжок часу взаємодіє він з молекулою, пролітаючи повз неї. Тому обидві ймовірності швидко досягають максимуму, а потім із збільшенням енергії електрона спадають. Із (рис. 2.5.6) видно, що електрон, який має енергію W' , із більшою ймовірністю буде викликати

іонізацію молекули, ніж її збудження.

Після розгляду видів самостійного розряду [182, с. 248] знайомимо учнів із четвертим станом речовини — плазмою, її властивостями та застосуваннями.

Підсумовуючи сказане, можна зробити висновок, що вивчення електричного струму у різних середовищах на основі квантових уявлень та фундаментальних фізичних понять в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів сприяє не тільки його систематизації з точки зору сучасних фізичних теорій, але і служить пропедевтичним етапом для більш глибокого і повнішого вивчення у профільних класах квантової фізики та формування сучасної квантово – польової картини світу.

2.6 Формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електромагнітного поля

У [116] було розглянуто один із можливих підходів до вдосконалення методики вивчення електромагнітної індукції (ЕМІ) у курсі фізики середньої школи. Його застосування сприяє не лише формуванню понять ЕМІ та вихрового ЕП у відповідності до їх сучасного розуміння, але й створює передумови для якісного засвоєння учнями змісту поняття ЕМП.

На нашу думку, у профільних класах вивчення властивостей ЕМП та формування відповідного поняття доцільно будувати на основі **фундаментальних фізичних понять (ФФП)**, зокрема таких як *відносність*, *симетрія* і *взаємодія* [163]. Останнє не лише дозволяє провести структурування навчального матеріалу розділу «Електродинаміка», але й дає змогу продемонструвати учням пізнавальну продуктивність ідей відносності та симетрії, які пронизують всю сучасну фізику [163; 229; 230; 236]. Завдяки цьому виникають можливості більш глибокого і аргументованого вивчення у наступному теорії відносності та фізики мікросвіту.

Зупинимось на основних моментах підходу, який ми пропонуємо.

Приступаючи до з'ясування властивостей ЕМП, звертаємо увагу на те, що під час вивчення ЕМІ було встановлено **дві якісно різних причини** виникнення індукційного струму у провідному контурі [194, с. 267-268]:

1. дія **магнітної сили** F_i на вільні заряди, які **рухаються** разом із ланками контуру щодо **стаціонарного магнітного поля** (МП): $F = q[\vec{v} \times \vec{B}] = \vec{n} q v B \sin \alpha$, $\vec{n} \perp \vec{B}$, $\vec{n} \perp \vec{v}$, $|\vec{n}| = 1$, де q – заряд носія струму ($q = -e$ у випадку металевого провідника); v – швидкість руху ланки контуру щодо МП (джерела МП); B – індукція МП в області руху ланки контуру.

2. дія **електричної сили** F_e на вільні заряди ланок контуру, які перебувають в **стані спокою** щодо **нестационарного МП**: $F_e = q\vec{E}$, де E –

напруженість вихрового ЕП, яке збуджується в області перебування ланки контуру під час зміни B .

Однак лишається незрозумілим, котре із пояснень відповідає дійсності у випадку зміни взаємної орієнтації контуру і індукції магнітного поля B .

З точки зору спостерігача, який перебуває у системі відліку (СВ), зв'язаній з МП (джерелом МП), відбувається рух ланок контуру щодо стаціонарного МП. З точки зору спостерігача у СВ, яка зв'язана з ланкою контуру, таке поле нестационарне внаслідок зміни напрямку B щодо контуру ($B=\text{const}$). Коли спостерігач у СВ, зв'язаній з джерелом МП вважає, що у контурі діють сторонні сили магнітної природи ($F_{\vec{n}\partial}=F_i$), то спостерігач у СВ, зв'язаній з контуром, стверджує, що сторонні сили за своєю природою електричні внаслідок існування вихрового електричного поля ($F_{\vec{n}\partial}=F_e$): $\Delta B/\Delta t \Rightarrow E$. Напрошується думка, що зведення ЕМІ до причин (1) і (2), перерахованих вище, не є повним: не виключено, що існує СВ, спостерігач у якій зможе обрахувати значення ЕРС індукції E_i , лише врахувавши одночасно дію F_i та F_e . Тобто мова повинна йти не про магнітну або електричну природу сторонніх сил, а про їх *електромагнітну* природу. Так що, взагалі кажучи, стосовно ЕМІ для сторонніх сил у довільній СВ:

$$F_{\vec{n}\partial}=F_e+F_i=q(E+\vec{v}\times B)=qE+nqv\|B\|\sin\alpha=F_E, \text{ де } -\vec{n}\perp B, \vec{n}\perp \vec{v}, |\vec{n}|=1,$$

E і B – напруженість електричного і індукція магнітного полів відповідно у СВ, по відношенню до якої розглядають те чи інше явище ЕМІ.

У цьому зв'язку розглянемо ЕМІ у *прямолінійній ланці металевого контуру*, яка рухається щодо стаціонарного МП із сталою швидкістю v (рис. 2.6.1) у вакуумі [162, с. 220]. У СВ К, зв'язаній з МП: $F_{\vec{n}\partial}=F_i=-e\vec{v}\times B$ ($F_e=0$, оскільки $\Delta B/\Delta t=0$). У СВ, зв'язаній з контуром (рис. 2.6.2), швидкість *впорядкованого* руху вільних зарядів – носіїв струму рівна нулю, так що $F_i'=0$, і $F_{\vec{n}\partial}'$ може бути зумовлена лише електричною силою $F_e'=-eE'$ (штрихування свідчить, що розгляд стосується «рухомої» СВ К', тобто СВ,

зв'язаної з ланкою контуру). Разом з тим, як свідчить дослід, *незалежно від спостерігача* у ланці контуру *реєструється одна і та ж ЕРС індукції*. Тому сторонні сили в обох випадках також повинні бути однакові: $F_{\bar{n}\delta}' = F_{\bar{n}\delta}$, тобто $F_e' = F_i$. Звідси отримуємо:

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} = \bar{n} v |\vec{B}| \sin \alpha, \quad \bar{n} \perp \vec{B}, \quad \bar{n} \perp \vec{v}, \quad |\bar{n}| = 1 \quad (2.6.1)$$

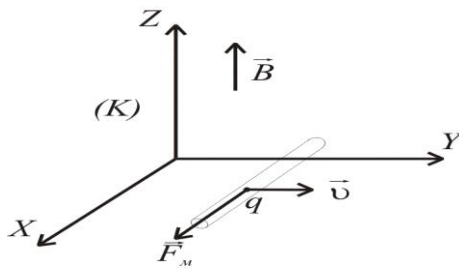


Рис. 2.6.1.

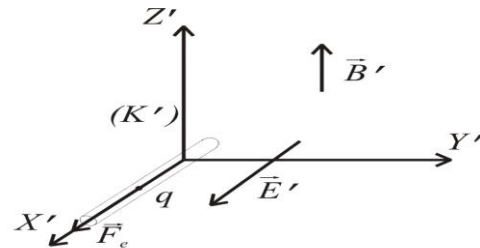


Рис. 2.6.2.

Таким чином, коли у «нерухомій» СВ існує лише МП з магнітною індукцією B , у «рухомій» СВ окрім цього існує ЕП з напруженістю $E \perp B$. *Електричне поле відносно* у тому розумінні, що його напруженість залежить від того, у якій СВ її вимірюють.

Нагадаємо учням, що з *відносним характером МП* вони вже стикалися раніше. У СВ, зв'язаній з точковим зарядом q («нештриховане»), існує лише

ЕП з напруженістю:

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3}. \quad (2.6.2)$$

У іншій СВ «штриховане», яка рухається щодо заряду і зв'язаного з ним ЕП із швидкістю v , поряд з ЕП існує МП, магнітна індукція якого рівна [169]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(-v) \times \vec{r}}{r^3} = -\frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\bar{n} v |\vec{r}| \sin \alpha}{r^3}, \quad \bar{n} \perp \vec{r}, \quad \bar{n} \perp \vec{v}, \quad |\bar{n}| = 1 \quad (2.6.3)$$

оскільки сам заряд щодо цієї СВ рухається із швидкістю $(-v)$.

Порівнюючи (2.6.2) і (2.6.3), помічаємо, що індукція магнітного поля B заряду q у СВ, щодо якої він рухається зі швидкістю $-v$, зв'язана із напруженістю електричного поля E у СВ, щодо якої він нерухомий:

$$\vec{B} = -\epsilon_0 \mu_0 v \times \vec{E} = -\bar{n} \epsilon_0 \mu_0 v |\vec{E}| \sin \alpha, \quad \bar{n} \perp \vec{E}, \quad \bar{n} \perp \vec{v}, \quad |\bar{n}| = 1 \quad (2.6.4)$$

Враховуючи, що довільне ЕП може розглядатися як суперпозиція електричних полів певної сукупності точкових зарядів, слід визнати, що (2.6.4) має загальний характер, так що із (2.6.4) пов'язана наступна реальність: якщо в деякій СВ існує лише ЕП, то в іншій СВ, яка рухається щодо неї, існує ще й МП. Підкреслюємо, що (2.6.1) і (2.6.4) є частковими випадками **перетворення полів** при переході від однієї СВ до іншої. Якщо деяка СВ («штрихована») перебуває в русі із швидкістю \vec{v} щодо іншої СВ («нештрихована»), причому в останній існують електричне поле з напруженістю \vec{E} та магнітне поле з магнітною індукцією \vec{B} , то з врахуванням принципу суперпозиції ЕП та МП:

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = \vec{E} + \vec{n} \|\vec{v}\| B \sin \alpha, \quad \vec{B}' = \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \vec{v} \times \vec{E} = \vec{B} - \vec{n} \epsilon_0 \mu_0 \|\vec{v}\| E \sin \alpha, \quad (2.6.5)$$

де $\vec{n} \perp \vec{B}$, $\vec{n} \perp \vec{v}$, $\vec{n} \perp \vec{E}$, $|\vec{n}| = 1$. Зауважуємо, що ці співвідношення підтверджуються дослідно, коли $v \ll c$. З пропедевтичною метою наголошуємо, що перше співвідношення ми отримали як наслідок з того, що явища ЕМІ описуються один і тим же законом, незалежно від того, розглядаються вони у «рухомій» чи у «нерухомій» СВ, – останнє має безпосереднє відношення до формулювання **принципу відносності** у наступному. Звертаємо увагу на певну **симетрію** (наявність множника $\epsilon_0 \mu_0$ визначається лише вибором системи одиниць), яка існує у записі співвідношень (2.6.5). Вона вказує на **рівноправність електричного і магнітного полів** та висновок про їх нерозривний зв'язок.

Оскільки напруженість ЕП \vec{E}' у «рухомій» («штрихованій») СВ визначається не лише напруженістю ЕП \vec{E} у «нерухомій» СВ, зв'язаній з цим ЕП, але й індукцією МП \vec{B} , яке існує у цій СВ, то, очевидно, слід говорити не про електричне і магнітне поля як такі, а про **єдину реальність** – **електромагнітне поле (ЕМП)**, яке за певних умов може **себе проявляти у формі ЕП або МП**. Як видно із (2.6.5), **ЕП та МП відносні одночасно** як взаємозв'язані **компоненти ЕМП**, інші суттєві властивості якого ще належить з'ясувати. Поділ фізичних явищ на електричні та магнітні, **врахування** при їх розгляді **лише електричної або лише магнітної взаємодії не є повним**. У всіх випадках мова повинна йти про **електромагнетизм** та **електромагнітну**

взаємодію, яка можлива завдяки наявності особливого середовища – *електромагнітного поля*. Інша річ, яку роль – визначальну чи другорядну – відіграє той чи інший компонент електромагнітної взаємодії у розвитку того чи іншого явища. Однак, як видно із (2.6.5), завжди можна знайти такі СВ, у яких визначальну роль відіграє лише один компонент – електричний або магнітний у зв'язку з відсутністю у цій СВ відповідно магнітного або електричного компонента ЕМП – магнітного або електричного поля.

Повертаємось до розгляду ЕМІ [137, с. 312; 247, с. 32]. Оскільки ЕРС довільного джерела струму рівна механічній роботі сторонніх сил $F_{\vec{n}\delta}$ по перенесенню одиничного позитивного заряду по електричному колу – замкненому провідному контуру, для ЕРС джерела E_i , яке індукується у довільному контурі у *випадку нестационарного МП*, отримуємо:

$$E_i = \frac{A_{e\delta}}{q} = \frac{\sum_{(l)} (F_{\vec{n}\delta})_l \cdot \Delta l}{q} = \frac{\sum_{(l)} (qE_i) \cdot \Delta l}{q} = \frac{q \sum_{(l)} E_i \cdot \Delta l}{q} = \sum_{(l)} E_i \cdot \Delta l, \quad (2.6.6)$$

де E_i – проекція напруженості вихрового ЕП, збудженого нестационарним МП, на малу ділянку контуру довжиною Δl ($\Delta l \ll l$ – довжини контуру, або формально $\Delta l \rightarrow 0$).

Зауважуємо, що величину $\sum_{(l)} E_i \Delta l$ у випадку $\Delta l \rightarrow 0$ називають *циркуляцією E по контуру (l)* за аналогією до $\sum_{(l)} B_l \Delta l$ – циркуляції B (у [72] вона без достатніх для цього підстав названа магніторушійною силою) [169]. Оскільки згідно із законом Фарадея для ЕМІ: $E_i = -\Delta \dot{O} / \Delta t$, то отримуємо:

$$\sum_{(l)} E_i \Delta l = -\frac{\Delta \dot{O}_B}{\Delta t}, \quad (2.6.7)$$

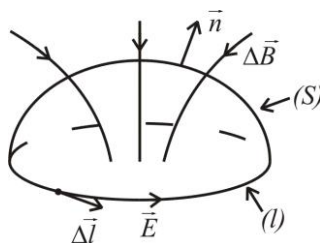


Рис. 2.6.3.

(Індекс « B » у правій частині введений, щоб підкреслити, що мова йде про потік вектора індукції МП B). Співвідношення (2.6.7) є формалізованим описом однієї із фундаментальних властивостей ЕМП: нестационарне (змінне у часі) МП збуджує вихрове ЕП, для якого $E \perp \Delta B$, причому

циркуляція напруженості ЕП по довільному контуру рівна з протилежним знаком швидкості зміни потоку магнітної індукції цього МП через довільну поверхню, натягнуту на контур (рис. 2.6.3).

Однак, оскільки ЕП та МП є рівноправними компонентами ЕМП, а у природі по відношенню до довільного процесу (явища) існує обернений, то слід очікувати, що нестаціонарне ЕП є причиною вихрового МП, для якого $\mathbf{B} \perp \Delta \mathbf{E}$. При цьому симетрія (5) щодо перестановок \mathbf{E} і \mathbf{B} та \mathbf{E}' і \mathbf{B}' нашо вухує на думку, що повинно існувати співвідношення, аналогічне (2.6.7), яке зв'язувало б \mathbf{B} і \mathbf{E} (точніше, циркуляцію \mathbf{B} та швидкість зміни потоку \mathbf{E}) і яке відрізнялося б від (2.6.7) лише перестановкою \mathbf{B} і \mathbf{E} та, можливо, деяким сталим множником, подібно до $(-\varepsilon_0 \mu_0)$ у (2.6.5) [162, с. 221].

У цьому зв'язку пропонуємо учням проаналізувати наступну комп'ютерну модель (мислений експеримент) [137, с. 338]. Нехай конденсатор C , між обкладками якого вакуум, є елементом розімкненого електричного кола (рис. 2.6.4). Після замикання ключа K у колі протікає електричний струм – *струм провідності*, який забезпечує заряджання конденсатора від напруги $U_0 = 0$ до $U = \mathbf{E}$ (рис. 2.6.5).

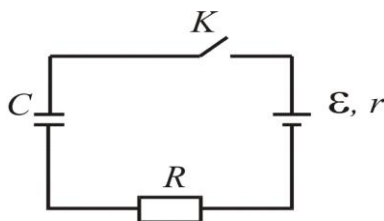


Рис. 2.6.4.

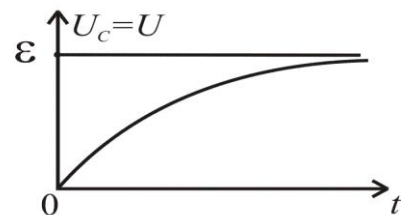


Рис. 2.6.5.

При цьому сила струму у колі по мірі зростання напруги на конденсаторі зменшується від $I_0 = \mathbf{E}/(R+r)$ до $I=0$ (рис. 2.6.6). Зрозуміло, що сила струму на протязі довільного малого проміжку часу Δt рівна: $I = \Delta q / \Delta t$, де Δq –

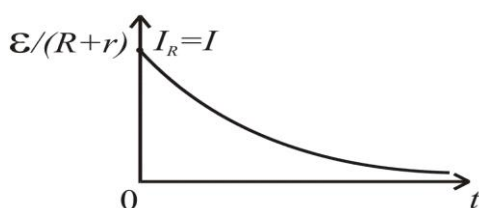


Рис. 2.6.6.

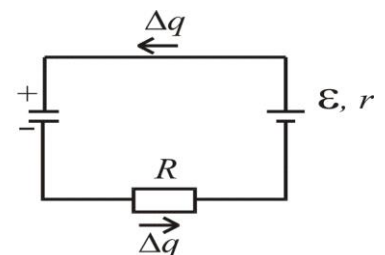


Рис. 2.6.7.

електричний заряд, який протік через провідники кола за Δt . Цей заряд рівний заряду, який отримала верхня обкладка конденсатора, або ж заряду, який був забраний від його нижньої обкладки (рис. 2.6.7). Звертаємо увагу учнів на те, що, по суті, відбувається обмін зарядами між обкладками конденсатора, однак *в просторі між ними ніякий заряд не переноситься: електричний струм провідності у просторі між обкладками не протікає* [162, с. 243].

Розглядаємо довільний контур (l), який охоплює провідник, по якому позитивний заряд поступає на верхню обкладку конденсатора (рис. 2.6.8) [194, с. 349; 247, с. 87]. Натягнемо на цей контур дві поверхні (S_1) і (S_2), перша з яких перетинає провідник і знаходиться за межами конденсатора, а друга провідник не перетинає, знаходячись частково між обкладками конденсатора. Згідно із законом Ампера (законом повного струму), циркуляція магнітної індукції *по довільному замкненому контуру* (l) з точністю до множника $\mu_0\mu$ рівна силі струму, який протікає через довільну поверхню (S), натягнену на контур [59]. Якщо в якості такої поверхні (S) розглядати (S_1), то у вакуумі ($\mu=1$) отримуємо:

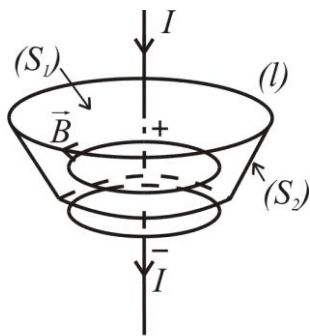


Рис. 2.6.8.

$$\sum_{(l)} \vec{B}_l \Delta l = \mu_0 I, \quad (2.6.8)$$

тоді як у випадку поверхні (S_2): $\sum_{(l)} \vec{B}_l \Delta l = 0$, оскільки перенесення заряду через (S_2) не відбувається і струм провідності через неї не протікає ($I=0$). Таким чином застосування закону Ампера до області між обкладками конденсатора приводить до хибного висновку про відсутність МП навколо провідника, по якому протікає струм.

Максвелл припустив, що закон Ампера вірний, однак у правій частині співвідношення (2.6.8) відсутній доданок, який формально описував би процеси, що відбуваються між обкладками конденсатора [220, с. 78-81]. Він зауважив, що між обкладками конденсатора існує ЕП, модуль напруженість якого E з часом змінюється у відповідності до того, як конденсатор набуває заряду. Вважаючи, що обкладки розміщені близько, можемо записати:

$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 S}$, де σ – поверхнева густина заряду додатної обкладки конденсатора; S – площа обкладки конденсатора; q – заряд конденсатора у довільний момент часу t .

Як видно, перенесення в колі на протязі проміжку часу Δt заряду Δq приводить до зміни модуля напруженості ЕП на $\Delta E = \Delta q / (\varepsilon_0 S)$. Таким чином, протікання *струму провідності у колі* із силою струму $I = \Delta q / \Delta t$ супроводжується зміною модуля напруженості ЕП у просторі між обкладками конденсатора із швидкістю:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_0 S} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{I}{\varepsilon_0 S}. \quad (2.6.9)$$

Оскільки гіпотетичний доданок у правій частині (2.6.8), який описує процеси між обкладками конденсатора, повинен бути рівним $\mu_0 I$, то для нього отримуємо: $\mu_0 I = \varepsilon_0 \mu_0 (\Delta E / \Delta t) S$.

У зв'язку з останнім для простору між обкладками конденсатора – області однорідного нестационарного ЕП у відповідності до (2.6.8):

$$\sum_{(l)} B_l \Delta = \varepsilon_0 \mu_0 \left(\frac{\Delta E}{\Delta t} \right) S = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\Delta(E S)}{\Delta t} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\Delta \hat{O}_E}{\Delta t},$$

де $\Delta \hat{O}_E$ – потік напруженості ЕП через довільну поверхню, натягнуту на (l) , оскільки у випадку однорідного поля цей потік рівний потоку через поверхню, яка співпадає з обкладкою конденсатора [55, с. 100-103; 182, с. 203-205]. Таким чином, якщо гіпотеза про незавершеність правої частини рівняння (2.6.8) справедлива, то із нестационарним ЕП повинне бути зв'язане вихрове МП, для якого $B \perp \Delta E$, причому:

$$\sum_{(l)} B_l \Delta = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\Delta \hat{O}_A}{\Delta t}. \quad (2.6.10)$$

У цьому зв'язку закон Ампера доцільно подати у вигляді:

$$\sum_{(l)} B_l \Delta = \mu_0 \left(I + \varepsilon_0 \frac{\Delta \hat{O}_E}{\Delta t} \right). \quad (2.6.11)$$

Доданок $\varepsilon_0(\Delta\dot{O}_E/\Delta t)$, який вимірюється у тих самих одиницях, що і сила струму провідності $I=\Delta q/\Delta t$, дістав назву **струму зміщення**, чим підкреслюється, що ніякого відношення до перенесення мікроскопічних електричних зарядів – струму провідності він не має, а його наявність зумовлена лише змінами E – нестационарного ЕП [182, с. 204].

Таким чином, гіпотеза Максвелла про необхідність розширення (узагальнення) закону Ампера приводить до з'ясування ще однієї фундаментальної властивості ЕМП, притаманність якої ЕМП була передбачена раніше на основі ідеї симетрії: нестационарне ЕП збуджує вихрове МП, для якого $B \perp \Delta E$, причому при відсутності струмів провідності у вакуумі справедливе (2.6.10) [194, с. 353].

Однак слід відмітити, що останній висновок лишався гіпотетичним у тій мірі, в якій було гіпотетичним припущенням про загальний характер закону Ампера. Вартує згадати також, що і твердження про існування зв'язку нестационарного МП та вихрового ЕП є також гіпотетичним. Разом з цим із цих гіпотез було отримано ряд висновків – теоретичних передбачень, які надалі були підтверджені експериментально, в першу чергу дослідженнями Г. Герца. Окрім того, на цій основі отримали вичерпне пояснення деякі явища, відомі фізикам до робіт Максвелла [133]. Останнє дозволило стверджувати, що гіпотеза Максвелла про існування ЕМП та його властивості відповідають дійсності [162, с. 251-255; 194, с. 355; 247, с. 93].

Таким чином, **електромагнітне поле** – середовище, завдяки якому здійснюється **електромагнітна взаємодія**, тобто взаємодія між часточками, які мають електричний заряд. **Електромагнітне поле** – особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між електрично зарядженими часточками, у вакуумі характеризується вектором напруженості електричного поля E і магнітною індукцією B , які визначають сили, діючі з боку поля на нерухомі і рухомі заряджені часточки. **Електромагнітне поле** нерухомих або рівномірно рухомих заряджених часточок нерозривно пов'язане з цими часточками; при прискореному русі часточок електромагнітне поле

"відривається" від них і існує незалежно у формі електромагнітних хвиль. Саме *електромагнітна взаємодія є фундаментальною*, тоді як електрична або магнітна взаємодія є лише її окремими проявами – компонентами. ЕМП характеризується напруженістю ЕП E та індукцією МП B , які і визначають силу, з якою заряджена часточка взаємодіє з ЕМП – силу Лоренца: $F = q(E + [vB]) = qE + \vec{n}qvB \sin\alpha E + \vec{n}qvB \sin\alpha$ [220, с. 76-77].

Електричні поля можуть бути зв'язані як із електричними зарядами (теорема Гаусса для ЕП), так і з нестационарним МП (закон ЕМІ Фарадея). Магнітні поля можуть бути зв'язані з електричними струмами провідності або нестационарними електричними полями (узагальнений закон Ампера – закон повного струму), причому у всіх випадках вони вихрові (теорема Гаусса для МП) [162, с. 251]. Останні твердження, подані у формальному вигляді, утворюють в єдності *систему рівнянь Максвелла*. Оскільки ці рівняння є *рівняннями законів електромагнетизму*, з'ясованих шляхом узагальнення експериментальних фактів, отриманих за певних умов, то вони застосовні лише до явищ, які протікають у *макросвіті* при *нерелятивістських швидкостях руху* відповідних об'єктів. Рівняння Максвелла є ядром *класичної теорії ЕМП – електромагнетизму* або *електродинаміки*. На факультативному занятті приводимо таблицю (таблиця 2.2), в якій *рівняння Максвелла для ЕМП у вакуумі* подані у систематизованому вигляді, будучи адаптовані для сприймання учнями профільних (фізичних, фізико – математичних, фізико – технічних) класів [220, с. 76; 247, с. 92-93].

Таблиця 2.2

Рівняння Максвелла для ЕМП у вакуумі

$\hat{O}_E = \sum_{(S)} E_n \Delta S = \frac{q}{\epsilon_0}$ /1	$\hat{O}_B = \sum_{(S)} B_n \Delta S = 0$ /3
$\sum_{(l)} E_l \Delta l = -\frac{\Delta O_B}{\Delta t}$ /2	$\sum_{(l)} B_l \Delta l = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\Delta O_E}{\Delta t}$ /4

⇕



Теорема Гаусса для електричного поля: з електричними зарядами зв'язані електричні поля. /1	Теорема Гаусса для магнітного поля: магнітні заряди відсутні; магнітне поле має вихровий характер./3
Закон електромагнітної індукції Фарадея: вихрове електричне поле збуджується нестационарним магнітним полем. /2	Узагальнений закон Ампера: магнітне поле зв'язане із рухомими зарядами або може збуджуватися нестационарним електричним полем./4

Звертаємо увагу учнів, що неповна симетрія (1) і (3) та (2) і (4) щодо \vec{E} і \vec{B} зумовлена виключно існуванням електричних зарядів та струмів. У просторі, вільному від зарядів і струмів, рівняння Максвелла набувають вигляду:

$\oint_{(S)} \vec{E}_n \Delta S = 0$ /1	$\oint_{(S)} \vec{B}_n \Delta S = 0$ /3
$\sum_{(l)} E_l \Delta l = -\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$ /2	$\sum_{(l)} B_l \Delta l = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t}$ /4

Зауважуємо, що наявність у правій частині (2') та (4') швидкостей зміни потоків \vec{B} та \vec{E} , які у кінцевому рахунку визначаються швидкостями зміни \vec{B} та \vec{E} ($\Delta \vec{B} / \Delta t$ та $\Delta \vec{E} / \Delta t$), означає можливість збудження і поширення у просторі електромагнітних хвиль – періодичних змін \vec{B} та \vec{E} , які відбуваються у взаємоперпендикулярних площинах. Пропонуємо учням обрахувати числове значення коефіцієнта у рівнянні (4'). Виявляється, що величина $1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ дорівнює швидкості поширення світлового випромінювання у вакуумі і є **швидкістю поширення у вакуумі електромагнітної взаємодії**, а саме світлове випромінювання є лише одним із видів **випромінювання електромагнітного** [162, с. 255]

Розглянутий підхід може бути використаний з успіхом в учнів профільних класів, а математичний запис рівнянь Максвелла для ЕМП у вакуумі доцільно розглянути на факультативному занятті. Разом з тим якісний аналіз явищ, проведений вище, цілком доступний учням загальноосвітньої школи.

2.7 Вивчення теми “Електромагнітні коливання” на основі енергетичного підходу та аналогії із механічними коливаннями

У програму з фізики для профільних класів [172, с. 15] при вивченні електромагнітних коливань включено наступні питання:

Коливальний контур. Виникнення електромагнітних коливань у коливальному контурі. Гармонічні електромагнітні коливання. Рівняння електромагнітних гармонічних коливань. Частота власних коливань контуру. Перетворення енергії в коливальному контурі. Затухаючі електромагнітні коливання. Вимушені коливання. Автоколивання. Резонанс.

При вивченні електромагнітних коливань використовуємо їх аналогію із механічними коливаннями. Такий підхід розроблено у [55, с. 4-34]. Згідно програми з математики [174] для класів *математичного, фізичного та фізико-математичного профілів*, розробленої на основі Державного стандарту базової і повної середньої освіти з урахуванням особливостей відповідних профілів навчання та орієнтовного тематичного плану вивчення алгебри і початків аналізу та геометрії для фізичного профілю учні на початку 11-го класу вивчають границю та неперервність функції, похідну функції та її застосування. Це важливо для нас у методичному плані, тому що вивчення закономірностей коливальних явищ, які характеризують коливальний процес в цілому, ми пропонуємо розглядати з точки зору теорії коливань, яка характеризується єдиним підходом до коливань різної фізичної природи із використанням похідної функції [55, с. 21].

Аналізуємо коло, що складається із послідовно з'єднаних котушки індуктивності, конденсатора, резистора, та джерела змінної напруги $\varepsilon(t)$ (рис. 2.7.1) – генератор напруги [247, с. 98]. Ставимо перед учнями наступну

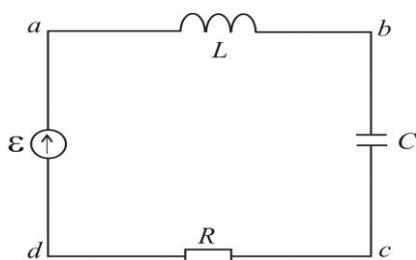


Рис. 2.7.1

пізнавальну задачу: знайти залежність сили струму $I(t)$ від часу.

Насамперед, підкреслюємо учням, що зміна струму на різних ділянках кола відбувається не

миттєво, а після деякого часу l/v , де l – лінійні розміри кола, а v – швидкість розповсюдження змінного ЕП. Ми припускаємо, що $l/v \ll T$, де T – час, протягом якого помітно змінюється напруга. Якщо напруга є періодичною функцією з періодом T , то цю умову можна записати у вигляді $l \ll \lambda$, де $\lambda = vT$ – довжина електромагнітної хвилі, що розповсюджується вздовж провідника.

Вибираємо додатний напрямок струму (вказаний стрілкою на рис. 2.7.1). Сила струму визначається співвідношенням $I(t) = q'(t)$, де $q(t)$ – функція, значення якої в момент часу t дорівнює заряду, що пройшов через довільний переріз провідника. Визначаємо напругу на кожному елементі схеми:

$$\varepsilon = \varphi_a - \varphi_b, \quad U_L = \varphi_a - \varphi_b, \quad U_C = \varphi_b - \varphi_c, \quad U_R = \varphi_c - \varphi_d. \quad (2.7.1)$$

Учням підкреслюємо, що в теорії електричних кіл здебільшого використовують два припущення [182, с. 259-260]. По-перше, що заряди, розподілені по поверхні провідників, малі в порівнянні із зарядом $q(t)$, розміщеним у місці розриву на обкладках конденсатора. Тому значення функції $q(t)$ співпадає із зарядом верхньої обкладки конденсатора в момент часу t : $q(t) = CU_C(t)$, а приріст $\Delta q = C\Delta U_C$. Отже, при вибраному додатному напрямі:

$$I(t) = q' = CU_C'. \quad (2.7.2)$$

Якщо $I > 0$, то додатний заряд перетікає від нижньої обкладки конденсатора до верхньої. По-друге, що можна не враховувати енергію МП, що збуджується струмом у всіх елементах кола, крім котушки індуктивності.

Отже, у розглядуваному наближенні ЕП зосереджене у конденсаторі, а МП – у котушці індуктивності, а енергія ЕМП дорівнює [247, с. 125]

$$W = \frac{1}{2}LI^2 + \frac{1}{2C}q^2. \quad (2.7.3)$$

В результаті дії зовнішнього джерела в колі виникає струм і ЕМП. Робота $I\varepsilon\Delta t$, що здійснюється джерелом над рухомими зарядами, переходить у тепло і затрачається на зміну енергії ЕМП. Отже, закон збереження енергії $I\varepsilon\Delta t = I^2R\Delta t + \Delta W$ можна подати у вигляді:

$$W = I\varepsilon - I^2R, \quad (2.7.4)$$

де W' – похідна по часу функції (2.7.3). Тут і далі внутрішній опір генератора $r = 0$. Підставляючи (2.7.3) і (2.7.4), отримуємо співвідношення:

$$LI' + \frac{q}{C} + IR = \varepsilon(t), \quad (2.7.5)$$

яке є другим законом Кірхгофа для кола, зображеного на рис. 2.7.1. Оскільки $I = q'$, $I' = q''$, то функція $q(t)$ задовольняє рівнянню:

$$Lq'' + Rq' + \frac{1}{C}q = \varepsilon(t). \quad (2.7.6)$$

Учням підкреслюємо, що коли $\varepsilon(t) = 0$ і $R = 0$, то ми маємо замкнуте коло, що складається із котушки L і конденсатора C і називається *коливальним контуром*. Демонструємо учням коливання у колі, що складається із індуктивності і електроємності (рис. 2.7.2) [105; 247, с. 118-119], та їх затування. Учням відмічаємо, що у реальних умовах опір провідників котушки хоч і малий, але відмінний від нуля. Для ґрунтовного засвоєння фізичної суті електричних коливань в контурі, поряд із малюнками, що зображають коливальний процес в контурі через кожну $\frac{1}{4}$ періоду, показуємо відповідні

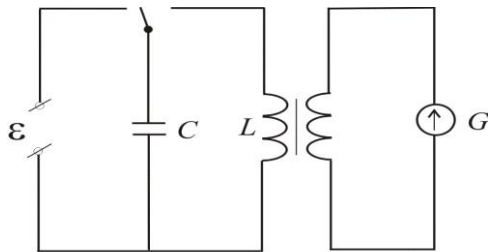


Рис. 2.7.2.

стани механічної коливальної системи [55, с. 24; 182, с. 259].

Оскільки $R = 0$, $\varepsilon(t) = 0$, то із (2.7.6) отримуємо рівняння коливального процесу:

$$q'' + \omega^2 q = 0, \quad (2.7.7)$$

де $\omega = 1/\sqrt{LC}$ – власна циклічна частота контуру, $T = 2\pi\sqrt{LC}$ – період власних коливань [55, с. 27]. Підкреслюємо, що розв'язок рівняння (2.7.7) залежатиме від початкових умов $q(0) = q_0$, $q'(0) = I_0$ (для того, щоб збудити коливання, необхідно надати контуру деяку кількість енергії W – в момент часу $t = 0$ до замикання контуру зарядити конденсатор або створити струм у котушці).

Початковий запас електромагнітної енергії дорівнює: $W_0 = \frac{1}{2}LI_0^2 + \frac{1}{2C}q_0^2$.

На основі аналогії із механічними коливаннями встановлюємо, що

розв'язком рівняння (2.7.7) буде функція [55, с. 28-29; 247, с. 125]:

$$q(t) = A \sin(\omega t + \alpha), \quad (2.7.8)$$

$$\text{де } A = \sqrt{q_0^2 + \left(\frac{I_0}{\omega}\right)^2}, \quad \cos \alpha = \frac{I_0}{\omega A}, \quad \sin \alpha = \frac{q_0}{A}.$$

Цю функцію можна зобразити у вигляді $q(t) = q_0 \cos \omega t + \frac{I_0}{\omega} \sin \omega t$. Сила струму також здійснює гармонічні коливання:

$$I(t) = \dot{q} = -q_0 \omega \sin \omega t + I_0 \cos \omega t = A \omega \cos(\omega t + \alpha)$$

Для глибшого розуміння фази гармонічних коливань розглядаємо рівномірний рух кульки по колу радіусу A з кутовою швидкістю ω (рис. 2.7.3).

Якщо відома функція $x(t) = A \sin(\omega t + \alpha)$, то гармонічному коливанню можна поставити у відповідність обертання по колу; значенням $x(t)$ відповідають визначені значення кута $\Phi(t)$ між радіус-вектором кульки і горизонталлю. Кут $\Phi(t)$ називають фазою коливань [55, с. 29].

Знаходимо електромагнітну енергію контуру із струмом у момент часу t .

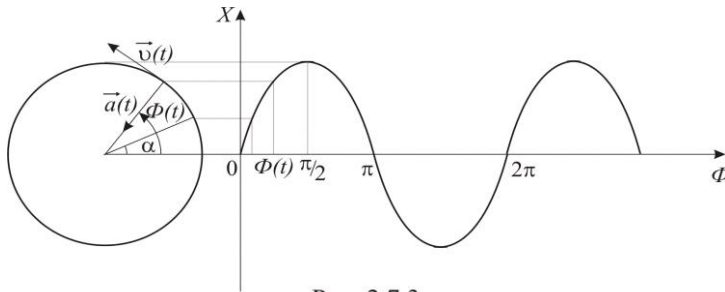


Рис. 2.7.3.

Отримуємо $W(t) = \frac{1}{2} L \omega^2 A^2$ – сталу величину. Аналізуємо вплив опору контуру на характер коливального процесу. Умови, при виконанні яких рівняння

$$q'' + \frac{R}{L} q' + \frac{1}{LC} q = 0 \quad (2.7.9)$$

переходить у рівняння (2.7.7), мають вид $|Rq'| \ll |Lq''|$, $|q/C|$. Підставляючи

сюди (2.7.8) знаходимо, що $R \ll R_x = \frac{1}{\omega C} = \omega L = \sqrt{\frac{L}{C}}$, де R_x – хвильовий опір.

Однак із (2.7.4) випливає, що навіть у випадку $R \ll R_x$ вся електромагнітна енергія зменшується, переходячи у теплоту. Отже, амплітуда коливань повинна зменшуватися, а при $t \gg T$ прямувати до нуля. Тому амплітуда є повільною функцією часу, а коливання заряду і струму в контурі є затухаючими коливаннями. Енергія у контурі теж спадає [247, с. 124; 194 с. 553].

При вивченні вимушених електромагнітних коливань та змінного струму підкреслюємо, що для отримання в контурі незатухаючих електромагнітних коливань потрібно безперервно поповнювати енергію ЕМП, компенсуючи втрати, зв'язані із її переходом у теплоту [247, с. 131-133].

Розглядаючи систему, показану на рис. 2.7.1, припускаючи, що напруга $\varepsilon(t)=0, t<0; \varepsilon(t)=\varepsilon_0 \cos \omega t, t \geq 0$. (контур підключається до джерела змінної напруги – зовнішнього генератора). Рівняння (2.7.6) для цієї схеми

$$Lq'' + Rq' + \frac{q}{C} = \varepsilon_0 \cos \omega t, t \geq 0. \quad (2.7.10)$$

Учням підкреслюємо, що внаслідок затухання протягом часу $t \gg \tau$ власні коливання, збуджені включенням генератора, припиняться. При $t \gg \tau$ дія періодично змінної напруги приведе до коливань: заряд і струм змінюються за гармонічним законом із частотою зовнішнього джерела, а амплітуда і фаза постійні [55, с. 34-36].

Тому розв'язок для коливань, що встановилися, шукаємо у вигляді:

$$q(t) = \frac{I_0}{\omega} \sin(\omega t + \varphi), \quad I(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (2.7.11)$$

де $I_0 = q_0 \omega$.

Для визначення I_0 і φ підставляємо $q(t)$ в (2.7.10), ввівши позначення:

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.7.12)$$

перепишемо отриману тотожність у виді

$$[(X_C - X_L) \sin \varphi + R \cos \varphi] I_0 \cos \omega t + [(X_C - X_L) \cos \varphi - R \sin \varphi] I_0 \sin \omega t = \varepsilon_0 \cos \omega t.$$

Прирівнюючи до нуля коефіцієнт при функціях $\cos \omega t$ і $\sin \omega t$, отримуємо рівняння: $[(X_C - X_L) \sin \varphi + R \cos \varphi] I_0 = \varepsilon_0, (X_C - X_L) \cos \varphi - R \sin \varphi = 0$.

$$\text{Вводимо величину } Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}. \quad (2.7.13).$$

$$\text{Тоді, припускаючи } \cos \varphi = \frac{R}{Z}, \quad \sin \varphi = \frac{X_C - X_L}{Z} \quad (2.7.14)$$

знаходимо розв'язок першого і другого рівнянь:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{Z}. \quad (2.7.15)$$

Із (2.7.15) робимо висновок, що амплітуда сили струму і напруги зв'язані співвідношенням, аналогічним закону Ома. В силу цього величину Z називають *повним опором* кола. Кут φ визначає зсув фаз струму і напруги, його значення лежать в області $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$.

Розглядаємо принцип одержання змінної ЕРС, діючі значення напруги й сили струму та три часткових випадки: активний опір, ємність та індуктивність у колі змінного струму [55, с. 41-51].

Отримані при вивченні змінного струму знання використовуємо при вивченні питань виробництва, передачі і розподілу електроенергії [55, с. 67-97]. Розглядаємо будову і роботу трансформатора і на прикладі однофазного трансформатора показуємо його дію. Спочатку розглядаємо режим холостого ходу, а потім навантаженого трансформатора [112; 113].

Запропонований нами підхід вивчення теми “Електромагнітні коливання” на основі енергетичного підходу та із використанням аналогії із механічними коливаннями, дозволяє розглядати електромагнітні коливання із точки зору єдиного підходу до коливань різної фізичної природи. Крім того, використання ФФП у даному підході дозволяє зробити матеріал більш доступним учням, одночасно поглиблюючи його науковий рівень з точки зору сучасних фізичних теорій.

На завершення відмітимо, що при вивченні коливань поряд із використанням графіків корисно зображати спектрограми сигналів. Учнів здебільшого знайомлять із цим поняттям тільки при вивченні оптики, і тому вони не отримують цілісного уявлення про спектральний метод як найважливіший при вивченні коливань і хвиль довільної природи [55, с. 177-181]. Якщо ввести поняття про спектр, то воно може стати одним із основних понять для вивчення акустичних явищ, розгляду фізичних основ радіозв'язку, а також оптичних явищ і допоможе зрозуміти суть і значення самого спектрального методу [55, с. 181]. Показуємо учням вигляд спектрограми гармонічного коливання. Спектр гармонічного коливання складається із однієї

лінії (рис. 2.7.4). Здійснити спектральний розклад негармонічного коливання

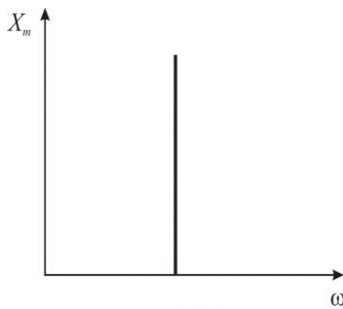


Рис. 2.7.4.

явищ.

можна з допомогою іншої коливальної системи, власну частоту якої можна змінювати. Як показав педагогічний експеримент, спектрограми, якщо їх використовувати поряд із графіками при вивченні електричного струму у різних середовищах та електромагнітних коливань, полегшують розуміння фізичної суті досліджуваних

2.8 Формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електромагнітних хвиль з використанням сучасних інформаційних технологій

Тема “Електромагнітні хвилі” охоплює в програмі для профільних класів велике коло питань: **Утворення і поширення електромагнітних хвиль. Гіпотеза Дж.Максвелла. Досліди Г.Герца. Швидкість поширення, довжина і частота електромагнітної хвилі. Ефект Х.Доплера. Шкала електромагнітних хвиль. Властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів частот. Електромагнітні хвилі в природі і техніці.** Принцип дії радіотелефонного та стільникового зв’язку. Радіомовлення і телебачення. Радіолокація. Стільниковий зв’язок. Супутникове телебачення.

Ми зупинимось на деяких методичних аспектах даної теми, які є найбільш складними. Але як показують проведені нами дослідження, матеріал теми отримує логічний зв’язок з іншими темами курсу електродинаміки та більш глибоко засвоюється учнями профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів, якщо його викладання базується на основі фундаментальних фізичних понять.

Необхідність наукового осмислення концептуальних положень сучасного змісту шкільного курсу електродинаміки на основі ФФП в умовах профільного навчання, його можливих структур та обґрунтування відповідної методики

навчання з використанням комп'ютерних технологій навчання є актуальною науковою проблемою, яка досліджена недостатньо.

На сучасному етапі в нашій країні цілим рядом дослідників і, зокрема, нами, проводиться пошук раціональних методик використання комп'ютерних технологій в процесі вивчення фізики [84, с. 100-109; 92, с. 5-14; 98, с. 130-148]. Одні з існуючих методик передбачають фрагментарне використання комп'ютера, інші – проведення уроків, на яких вивчення нового матеріалу та контроль його засвоєння проводиться комп'ютером.

Серед існуючих форм використання комп'ютерних технологій, особливо в профільних класах з поглибленим вивченням фізико – математичних дисциплін, ми надаємо перевагу фрагментарному використанню комп'ютера, яке супроводжує розповідь учителя на уроці. В процесі підготовки уроків з використанням комп'ютерних технологій до файлів вміщуємо:

- питання для актуалізації отриманих знань;
- новий матеріал, який необхідно пояснити на уроці в супроводі ілюстрацій та динамічних моделей явищ, що вивчаються;
- завдання для закріплення та систематизації вивченого матеріалу;
- завдання для з'ясування ступеня засвоєння нового матеріалу учнями.

В процесі фрагментарного використання комп'ютерних технологій на уроці, ми застосовували такі форми роботи та методичні прийоми:

- тестувальну програму "SunRav TestOffice";
- комп'ютерні моделі фізичних явищ для пояснення нового матеріалу;
- комп'ютерні моделі для проведення пошукової самостійної роботи .

Вивчення поняття електромагнітної хвилі починаємо з розгляду змінного електричного і змінного магнітного полів [106, с. 314; 194, с. 620]. Формули

$$\sum_{\Gamma} E_e \cdot \Delta = -\frac{\Delta \dot{\Phi}}{\Delta t}, \quad (2.8.1)$$

$$\sum_{\Gamma} B_e \cdot \Delta = \mu_0 \mu I + \mu_0 \mu \varepsilon \cdot \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t} \quad (2.8.2)$$

циркуляції електричного і магнітного векторів дозволяють теоретично

встановити властивості ЕМХ у вакуумі. Сукупність цих формул була використана Максвеллом для передбачення ЕМХ. Ставимо перед учнями питання: що відбуватиметься у вакуумі, де струм і заряди відсутні, а є змінні ЕП і МП? Для відповіді на нього аналізуємо формули (2.8.1) і (2.8.2).

Розглядаємо миттєве включення струму в провіднику, який являє собою нескінченну площину (за методом, запропонованим Р.Фейманом [220, с. 83]).

Із міркувань симетрії випливає, що коли є площина із струмом в додатному y -напрямку (рис. 2.8.1), виникає МП, напрямлене в від'ємному z -напрямку при $x > 0$ і в додатному z -напрямку при $x < 0$. В результаті руху зарядженої площини збуджується змінне МП і, отже, повинні виникати електричні ефекти. Якщо ж ЕП утворились, то вони повинні починатися з нуля і змінюватися до якого-небудь значення, і, в свою чергу, вноситимуть вклад разом із струмом j у збудження МП. Так різні поля зачіпляються одне за одного і нам потрібно знайти розв'язок для всіх полів зразу.

Включене поле B розповсюджується від області джерела. Через деякий час появляється однорідне МП всюди, аж до деякого значення x , а за ним воно рівне нулю. Внаслідок симетрії воно розповсюджується як в додатному, так і в від'ємному x -напрямку (рис. 2.8.1).

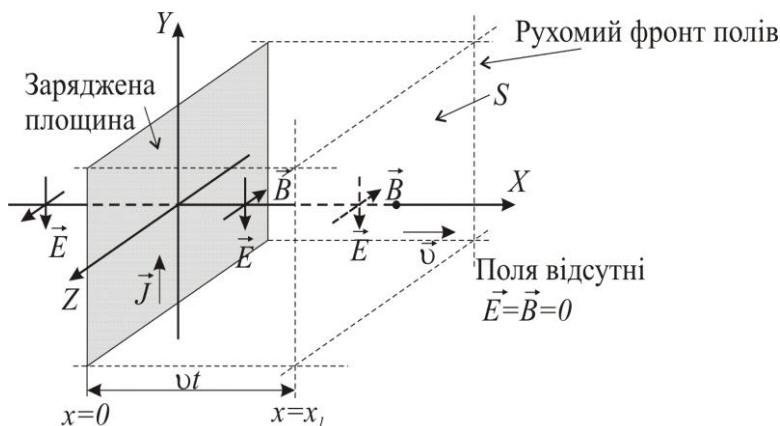


Рис. 2.8.1.

вперед, причому фронт їх рухається з постійною швидкістю U .

Щоб проаналізувати кількісно те, що відбувається, розглядаємо два поперечних розрізи: вигляд збоку, якщо дивитись назад вздовж осі z (рис. 2.8.2) і вигляд зверху, якщо дивитись вздовж осі y (рис. 2.8.3) [220, с. 85-86].

Поле E робить те ж саме. До моменту $t=0$ (коли ми включаємо струм) поле всюди рівне нулю. Потім, через час t , як E , так і B постійні аж до відстані $x = U \cdot t$, а за нею рівні нулю. Поля просуваються

На рис. 2.8.3 ми бачимо заряджену площину, що рухається вгору. Виберемо контур обходу в виді прямокутника, перпендикулярний до площини струму і розміщений вздовж струму. Одна сторона прямокутника проходить в області, де є поля, а інша – в області, до якої ще поля не дійшли. Через цей уявний контур проходить магнітний потік. Якщо він змінюється, повинна згідно (1) з'явитися ЕРС вздовж контуру. Якщо хвильовий фронт рухається, ми маємо змінний магнітний потік, оскільки поверхня, всередині якої існує поле \vec{B} , безперервно збільшується зі швидкістю U .

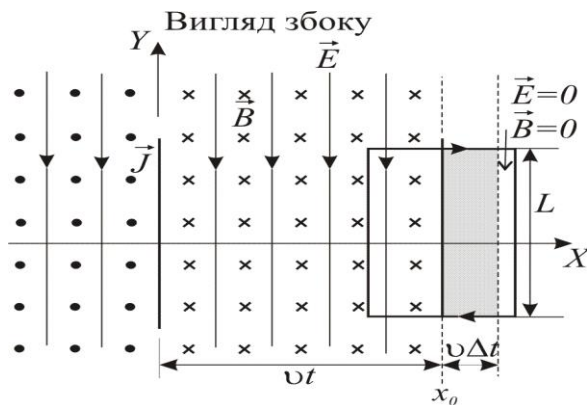


Рис. 2.8.2.

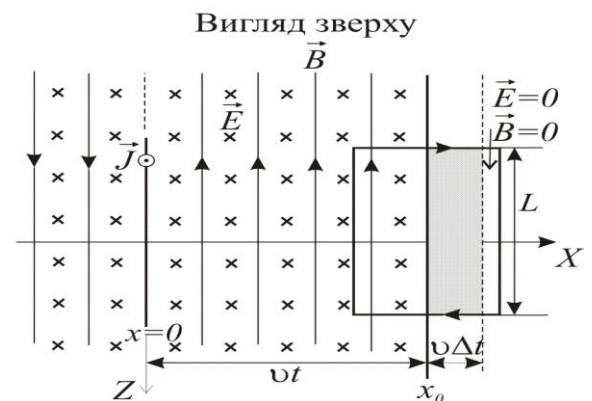


Рис. 2.8.3.

Швидкість зміни магнітного потоку дорівнює добутку вектора B на швидкість зміни поверхні (оскільки $B = \text{const}$): $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot L \cdot \Delta t}{\Delta t} = BLU$. За законом Фарадея швидкість зміни магнітного потоку дорівнює циркуляції вектора \vec{E} вздовж прямокутного контуру, яка рівна EL (рис. 2.8.2). Отримуємо рівність:

$$E = U \cdot B \quad (2.8.3)$$

Щоб застосувати рівняння (2.8.2), розглядаємо вигляд зверху, зображений на рис. 2.8.3. Прямокутний контур обходу вибираємо так, як зображено на рис. 2.8.3. Тут немає струму, тому рівняння (2.8.2) перепишеться у вигляді:

$$\sum B_l \Delta l = \mu_0 \mu_{\text{в}} \varepsilon \cdot \frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t} \quad (2.8.4)$$

Циркуляція B дорівнює добутку B на L . Швидкість зміни потоку вектора E дорівнює $\frac{E \cdot L \cdot \Delta t}{\Delta t} = ELU$ і рівняння (2.8.4) набуде вигляду:

$$B = \mu_0 \mu \varepsilon E v \quad (2.8.5)$$

Оскільки для вакууму $\varepsilon = \mu = 1$, а добуток $\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$, де c — швидкість світла, то (2.8.5) переписеться у вигляді:

$$E = \frac{c^2 B}{v} \quad (2.8.6)$$

Ми знайшли два різних вирази (2.8.3) і (2.8.6) для відношення E/B . Є лише одна швидкість v , для якої обидва ці рівняння будуть справедливими, а саме $v = c$. Тобто, конфігурація полів переміщується зі швидкістю c . Ставимо перед учнями проблему: що відбудеться, якщо ми миттєво зупинимо заряджену площину, після того, як вона рухалася протягом короткого часу T ?

Використовуючи принцип суперпозиції полів, показуємо учням, що якщо миттєво включаємо, а потім миттєво виключаємо струм, то отримаємо маленький кусочок поля, який покинув заряджену площину і рухається у просторі – тобто поля розповсюджуються вільно у просторі і більше не зв'язані із джерелом. Отже, сукупність ЕП і МП розповсюджується з швидкістю c і характеризується хвильовими властивостями [194, с. 356-357].

Максвелл розглянув рівняння (2.8.1) і (2.8.2) сумісно і знайшов розв'язок, який відповідає розповсюдженню імпульсу електромагнітного випромінювання. Швидкість розповсюдження цього імпульсу виявилась рівною швидкості світла [220, с. 89]. Тому Максвелл і ототожнив імпульс випромінювання із самим світлом: "... ми маємо серйозні основи зробити висновок, що само по собі світло (включаючи променеву теплоту і інші випромінювання) є електромагнітними збуреннями в формі хвиль, які розповсюджуються через електромагнітне поле згідно законів електромагнетизму" [133, с. 263; 192 с. 12-14].

Учням підкреслюємо, що ЕМХ існує без джерел полів в тому сенсі, що після її випромінювання ЕМП хвилі не зв'язане з джерелом. Цим ЕМХ відрізняється від статичних ЕП і МП, які не існують у відриві від джерела.

Підводимо учнів до висновку, що **випромінювання ЕМХ відбувається**

при прискореному русі електричних зарядів. Щоб пояснити, як поперечне ЕП хвилі виникає із радіального кулонівського поля точкового заряду, користуємось міркуваннями, запропонованими Дж.Томсоном [106; 162, с. 165].

Розглядаємо ЕП, створене точковим зарядом q у вакуумі. Якщо заряд перебуває в спокої, то його електростатичне поле зображається радіальними лініями вектора E , які виходять із заряду. Нехай в момент часу $t=0$ заряд під дією зовнішньої сили починає рухатись із прискоренням a , а через деякий час τ ця сила перестає діяти, так що заряд рухається далі рівномірно із швидкістю $v=a\tau$ ($v < c$). Оскільки ЕП розповсюджується із швидкістю світла c , то до точок, які лежать за межами сфери радіусу ct , де $t > \tau$, зміна ЕП, визвана рухом заряду, дійти не могла: за межами цієї сфери поле таке ж, яким воно було при нерухомому заряді (рис. 2.8.4). Напруженість цього поля дорівнює:

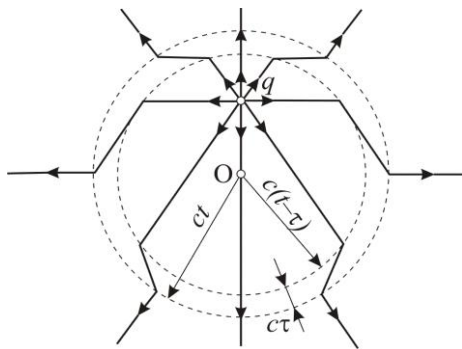


Рис. 2.8.4.

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (2.8.7)$$

Всі зміни ЕП, визвані прискореним рухом заряду протягом часу τ , в момент часу t знаходяться всередині тонкого кульового шару товщиною $c\tau$, зовнішній радіус якого дорівнює ct , а внутрішній радіус $c(t-\tau)$. Всередині сфери радіусу $c(t-\tau)$ ЕП – це поле заряду, що рівномірно рухається. Картину ЕП всередині кульового шару знаходимо, враховуючи неперервність ліній E (рис. 2.8.4) [162, с. 166; 247, с. 85]. Щоб знайти поле випромінювання, розглядаємо одну із силових ліній, яка утворює кут θ з напрямом руху заряду (рис. 2.8.5) [162, с. 167]. Проводячи нескладні математичні міркування, встановлюємо, що напруженість ЕП в хвилі, яка випромінена зарядом при прискореному русі рівна

$$E_{\perp} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qa}{c^2 r} \sin\theta, \quad (2.8.8)$$

де a — прискорення, з яким рухався заряд протягом часу τ .

Звертаємо увагу учнів на те, що напруженість ЕП хвилі E_{\perp} зменшується обернено пропорційно відстані r від центра, на відміну від напруженості електростатичного поля E_{\parallel} , яка пропорційна $1/r^2$. Таку залежність від відстані можна отримати, виходячи із закону збереження енергії [162, с. 184].

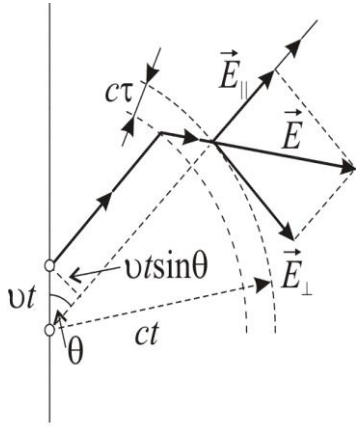


Рис. 2.8.5.

Припустимо тепер, що заряд q весь час рухається вздовж прямої із змінним прискоренням $a(t)$, наприклад, здійснює гармонічні коливання. Тоді напруженість ЕП у точці, що знаходиться на відстані r від початку координат, буде:

$$\dot{A}_{\perp}(t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q a \left(t - \frac{r}{c} \right)}{c^2 r} \cdot \sin\theta, \quad (2.8.9)$$

(поле E_{\perp} в момент часу t залежить від прискорення a заряду q у момент часу $\left(t - \frac{r}{c} \right)$). Нехай рух заряду являє собою гармонічне коливання у початку координат з амплітудою A і частотою ω [182, с. 313-315]:

$$x(t') = A \cos \omega t'. \quad (2.8.10)$$

Прискорення заряду $a(t')$ матиме вигляд:

$$a(t') = \ddot{x}(t') = -\omega^2 A \cos \omega t'. \quad (2.8.11)$$

Підставляючи (2.8.11) у (2.8.9) отримаємо:

$$\dot{A}_{\perp}(t) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \omega^2 A \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)}{c^2 r} \cdot \sin\theta, \quad r \gg A. \quad (2.8.12)$$

Якщо $E_{\perp}(t)$ змінюється з часом, то це означає згідно (2.8.2) наявність струму зміщення, який збуджує вихрове МП. Виникає змінний магнітний потік, а отже, згідно (2.8.1), і вихрове ЕП і т. д. Тобто, у хвильовій зоні електричні і магнітні вектори перпендикулярні один одному і радіус – вектору \vec{r} та коливаються за гармонічним законом і являють собою ЕМХ.

Отже, при прискореному русі заряду q **зміна ЕП і МП в будь-якій точці**

являє собою гармонічне коливання з частотою ω ; електричний заряд випромінює електромагнітну монохроматичну хвилю (енергію), якщо він рухається прискорено [194, с. 635].

Ставимо перед учнями пізнавальну проблему: чи існує зв'язок між густиною потоку енергії в ЕМХ та напрямком її поширення? У якому напрямку середнє значення густини потоку енергії найбільше? Для дослідження останнього використати комп'ютерну програму «Gran1 – Демо».

1) Густину енергії ЕП ω_e монохроматичної хвилі, що випромінюється зарядом, учні знаходять з формули (2.8.12):

$$\omega_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \dot{A}_{\perp}^2 = \frac{1}{32\pi^2 \varepsilon_0} \cdot \frac{q^2 \omega^4 A^2 \cos^2 \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)}{c^4 r^2} \cdot \sin^2 \theta, \quad (2.8.13)$$

Звертаємо увагу учнів профільних класів, що густина енергії ЕП пропорційна квадрату амплітуди коливань заряду і четвертій степені частоти. Густина енергії МП виражається через індукцію B [182, с. 314]:

$$\omega_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}. \quad (2.8.14)$$

2) Як залежить індукція МП в такій хвилі від координат і часу? Прирівнюючи густину енергії ЕП і МП в біжучій ЕМХ, учні переконуються, що індукція МП в такій хвилі залежить від координат і часу так само, як і напруженість ЕП. Тобто, $B_{\perp} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} E_{\perp} = \frac{1}{c} E_{\perp}$.

3) Пропонуємо учням самостійно знайти середнє значення густини потоку енергії $\langle j \rangle = c\omega$:

$$\langle j \rangle = \frac{1}{32\pi^2 \varepsilon_0} \cdot \frac{q^2 \omega^4 A^2}{c^3 r^2} \cdot \sin^2 \theta, \quad (2.8.15)$$

Використовуючи комп'ютерну програму «Gran1 – Демо» для побудови графіка залежності середнього значення густини потоку енергії ЕМХ від напрямку її поширення та аналізуючи (2.8.15), учні роблять висновок, що у напрямку коливання заряду, енергія зовсім не випромінюється ($\sin\theta=0$).

Найбільша кількість енергії випромінюється в площині перпендикулярній до цього напрямку (рис.2.8.6) [182, с. 314; 194, с. 633]. Пропонуємо учням самостійно обчислити середнє значення густини потоку енергії ЕМХ від напрямку її поширення.

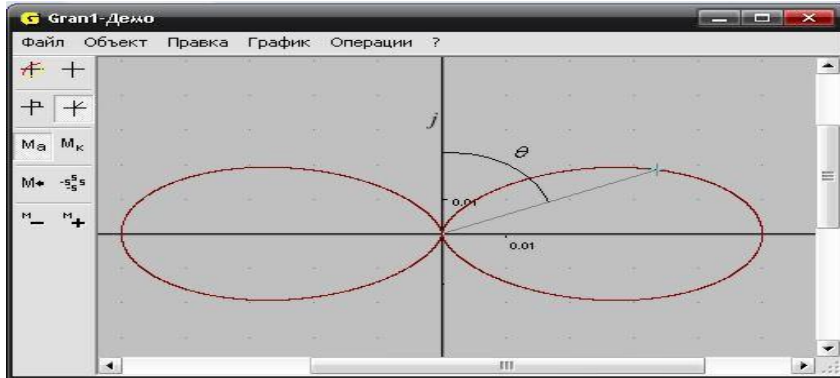


Рис. 2.8.6.

Встановлюємо властивості ЕМХ [182, с. 306; 194, с. 620; 247, с. 233]:

1. Вектор напруженості E ЕП і вектор магнітної індукції B перпендикулярні до напрямку розповсюдження хвилі. Тобто ЕМХ – поперечні. Напрямок розповсюдження хвилі визначають правилом правого гвинта при повороті E до B за найкоротшим шляхом.
2. E і B перпендикулярні один одному.
3. $E=cB$.

Відмічаємо внутрішню симетрію ЕМХ : вектори E і B коливаються в одній фазі, тобто, одночасно перетворюються в нуль і одночасно досягають максимуму. Для векторів E і B , які змінюються за гармонічним законом будуємо просторовий графік монохроматичної ЕМХ, який ілюструє її властивості. Приведені вище міркування підводять учнів до висновків, що у ЕМХ вектор напруженості ЕП E і вектор магнітної індукції B перпендикулярні до напрямку розповсюдження хвилі. Тобто, ЕМХ – поперечні. Напрямок розповсюдження хвилі визначають правилом правого гвинта при повороті E до B за найкоротшим шляхом.

Розглядаючи рівняння ЕМХ, відмічаємо симетрію формул, які описують коливання E і B . Властивості ЕМХ (відбивання, заломлення, інтерференція,

дифракція, поляризація) вивчаємо дослідним шляхом. Щоб уникнути труднощів при викладанні властивостей ЕМХ розглядаємо біжучі хвилі на струні, оскільки їх легше уявити, ніж ЕМХ.

Підкреслюємо простоту класичного критерію, який дозволяє встановити, чи розповсюджується ЕМХ: у всіх випадках, коли заряд рухається з прискоренням, генерується електромагнітне випромінювання. Механізм генерування, розглянутий нами вище, служитиме ключем до оволодіння матеріалом про будову атома (і розуміння квантової механіки).

2.9 Формування фундаментальних фізичних понять (симетрія, відносність, взаємодія, ймовірність, невизначеність, фотон) в учнів профільних класів у процесі вивчення світлових хвиль з використанням сучасних інформаційних технологій

Традиційний підхід до вивчення електромагнітних хвиль (ЕМХ) та світлових хвиль (СХ) у курсі шкільної електродинаміки не повністю розкриває їх взаємозв'язок. У програму з фізики для профільних класів [172, с. 15] при вивченні світлових хвиль включено наступні питання: **Світло як електромагнітна хвиля. Когерентність світлових хвиль. Інтерференція світла. Способи спостереження інтерференції світла. Інтерферометр А.Майкельсона. Інтерференційні картини в тонких пластинках і плівках. Кільця І.Ньютона. Голографія та умови її спостереження. Голографічний метод Г.М.Денисюка. Дифракція світла. Зони Френеля. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракційні картини від щілини, тонкої нитки. Дифракційна ґратка. Дифракційний спектр. Роздільна здатність оптичних приладів. Дисперсія світла. Проходження світла крізь призму. Неперервний спектр світла. Спектроскоп. Поляризація світла. Природне і поляризоване світло. Методи отримання поляризованого світла. Поляризація внаслідок відбиття і заломлення світла. Кут Д.Брюстера.**

Квантові властивості світла. Гіпотеза М.Планка. Світлові кванти.

Стала Планка. **Маса, енергія та імпульс фотона.** Тиск світла. *Дослід Лебедева.* *Ефект А.Комптона.* *Дослід В.Боте.* **Фотоефект.** Досліди О.Г.Столетова. Закони зовнішнього фотоефекту. **Рівняння фотоефекту.** *Внутрішній фотоефект.* *Фоторезистор і фотоелементи.* **Застосування фотоефекту.** Фотохімічні реакції. **Люмінесценція.** Фотохімічна дія світла. *Спонтанне і вимушене випромінювання.* **Квантові генератори та їх застосування.** Принцип дії квантових генераторів. *Лазери і мазери.*

Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла. *Гіпотеза де Бройля.* *Хвильові властивості частинок.* *Поняття про квантову механіку.*

Зрозуміло, що обсяг та глибина викладу відповідного навчального матеріалу у курсах загальної [106, с. 400-478; 182, с. 316-478] та елементарної фізики [55, с. 138-251] істотно відрізняються, однак і в одному, і в другому випадках першочерговим є засвоєння студентами і учнями знань освітнього та виховного характеру та розвиток у них наукового мислення. Крім того, під час вивчення СХ у загальноосвітній школі відсутні інваріанти, які дозволили б структурувати розділ «Світлові хвилі», та відсутні передумови для побудови квантової моделі електромагнітного випромінювання без логічного конфлікту із знаннями, здобутими під час вивчення шкільного курсу класичної електродинаміки.

Запропонований нами методичний підхід до вивчення ЕМХ у курсі фізики загальноосвітньої школи [110] створює передумови для якісного засвоєння учнями змісту поняття «світлова хвиля». У школі вивчення властивостей СХ і формування відповідного поняття доцільно будувати на основі фундаментальних фізичних понять (ФФП), зокрема, таких як симетрія, відносність, взаємодія, ймовірність, невизначеність, фотон, із використанням СІТ [98, с. 100-108; 110, с. 38-42; 106, с. 314; 182, с. 316-478], що дає змогу провести структурування навчального матеріалу курсу «Електродинаміка» та продемонструвати учням пізнавальну продуктивність ФФП, які пронизують усю сучасну фізику [106; 162; 194; 215; 218]. ЕМХ - одна із сторін поняття

фотон, тому вивчення інтерференції і дифракції для ЕМХ довільного діапазону на прикладі СХ буде емпіричною основою для вивчення інтерференції і дифракції довільного об'єкта що має хвильові властивості [183, с. 62]. Завдяки цьому виникають можливості для глибокого й аргументованого вивчення теорії відносності та квантової фізики [247, с. 260].

Тому розробка методики формування поняття «світлова хвиля», та методичного підходу вивчення оптики на основі системи ФФП із використанням сучасних інформаційних технологій для профільних класів старшої школи є актуальною проблемою.

Зупинимося на основних моментах підходу, який ми пропонуємо.

Згідно з програмою курсу фізики загальноосвітньої школи [172, с. 16-17], вивчення розділу «Світлові хвилі» проводять на основі наявних у учнів знань про властивості електромагнітних хвиль (ЕМХ), одним із різновидів якого є хвилі світлові (СХ).

1. Вивчення хвильової теорії світла розпочинаємо із з'ясування змісту поняття світлова хвиля (СХ) та зв'язку його з поняттям світловий промінь (СП) [55, с. 138]. Користуючись поняттям СХ за аналогією до принципу суперпозиції механічних хвиль постулюємо принцип суперпозиції СХ Юнга, на основі якого в подальшому розглядаємо інтерференцію світла [55, с. 141-151; 106, с. 401; 182, с. 347]. Однак, тут важливо наголосити, що принцип Юнга є лише частковим проявом принципу суперпозиції електромагнітних хвиль, який застосовний лише до ЕМХ помірних (не надто низьких і не надто високих) інтенсивностей [137]. Підкреслюємо, що закономірності інтерференції, які тут з'ясовують на прикладі інтерференції СХ, справедливі для інтерференції ЕМХ будь-якого діапазону.

Нехай дві хвилі однакової частоти, які накладаються одна на одну, збуджують в деякій точці простору коливання однакового напрямку $A_1 \cos(\omega t + \alpha_1)$, $A_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$. Амплітуда результуючого коливання в даній точці визначається виразом [182, с. 353]:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta, \quad (2.9.1)$$

де $\delta = \alpha_2 - \alpha_1$. Звідси, інтенсивність, що спостерігається при накладанні хвиль:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \delta. \quad (2.9.2)$$

Аналізуючи дане співвідношення, приходимо до висновку, що при накладанні СХ відбувається перерозподіл світлового потоку в просторі, внаслідок чого в одних місцях виникають максимуми, а в інших – мінімуми інтенсивності, що дістало назву інтерференції СХ. [55, с. 142].

При поясненні інтерференції важливе місце приділяємо когерентності – узгодженому протіканню кількох хвильових процесів. Аналізуючи часову когерентність цугів хвиль [55, с. 141; 247, с. 196]:

$$t_{\bar{a}\bar{a}} \sim \frac{1}{\Delta\nu}, \quad l_{\bar{a}\bar{a}} = ct_{\bar{a}\bar{a}} \sim \frac{c}{\Delta\nu}, \quad (2.9.3)$$

приходимо до висновку, що чим ширший інтервал частот в даній СХ, тим менший час когерентності цієї хвилі. При аналізі довжини просторової

$$\text{когерентності } \rho_{\bar{a}\bar{a}} \sim \frac{\lambda}{\varphi}, \quad (2.9.4)$$

аналізуємо кутові розміри джерела, при яких спостерігається інтерференція.

Зауважимо, що причини обмежень, які накладає на спостереження інтерференції некогерентність ЕМХ, можуть бути детально з'ясовані лише під час вивчення інтерференції фотонів у квантовій фізиці. З'ясуємо фізичний зміст співвідношення

$$\delta = \frac{2\pi\Delta L}{\lambda_0}, \quad (2.9.5)$$

та приходимо до висновку:

$$1) \text{ якщо } \Delta L = \pm m\lambda_0, \quad (m=0,1,2,\dots), \quad (2.9.6)$$

то різниця фаз δ кратна 2π і коливання, що збуджуються у точці P двома хвилями, відбуваються в однаковій фазі, – умова інтерференційного максимуму;

$$2) \text{ якщо } \Delta L = \pm(m + \frac{1}{2})\lambda_0, \quad (m=0,1,2,\dots), \quad (2.9.7)$$

то $\delta = \pm(2m+1)\pi$ і коливання у точці P знаходяться в протифазі, тобто це є умова інтерференційного мінімуму. Розглядаючи дві циліндричні когерентні СХ, що

виходять із джерел S_1 і S_2 (рис. 2.9.1), розміщених симетрично відносно точки відліку O , отримуємо координати для максимумів та мінімумів інтенсивності [182, с. 350]:

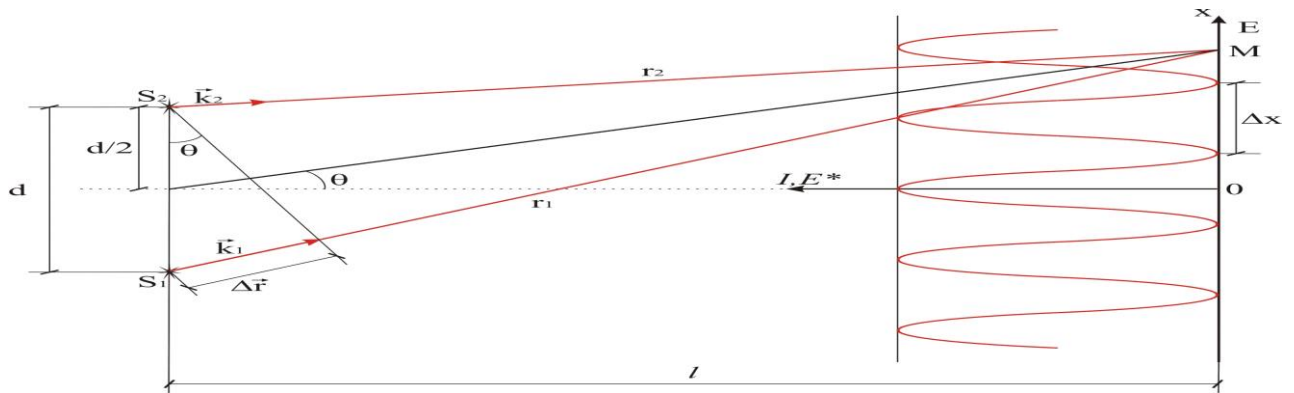


Рис. 2.9.1 Інтерференція СХ за схемою Юнга

$$x_{\max} = \pm m \frac{l}{d} \lambda, \quad (m=0,1,2,\dots), \quad (2.9.8)$$

$$x_{\min} = \pm (m + \frac{1}{2}) \frac{l}{d} \lambda, \quad (m=0,1,2,\dots), \quad (2.9.9)$$

та ширину інтерференційної смуги

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda. \quad (2.9.10)$$

Якщо інтенсивність СХ однакова, $I_1 = I_2 = I_0$, то згідно (2.9.2) інтенсивність в точках, для яких різниця фаз дорівнює δ , визначається виразом

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}. \quad (2.9.11)$$

Ретельний аналіз особливостей інтерференції СХ за схемою Юнга та з'ясування фізичного змісту співвідношень (2.9.1), (2.9.2), (2.9.5), (2.9.11) служить основою для вивчення статистичної інтерпретації хвильової функції – фундаментального поняття квантової механіки. Для аналізу (2.9.8), (2.9.9), (2.9.10) використовуємо комп'ютерну модель «Інтерференція світла у досліді Юнга» (рис. 2.9.2) [110].

Слід відмітити, що ми використовуємо віртуальний фізичний експеримент як доповнення реального, або в якості заміщення (імітації), якщо реальний шкільний навчальний експеримент неможливо реалізувати. В якості практично значущих наслідків теорії інтерференції світла доцільно детально

розглянути методи інтерферометрії та просвітлення оптики. Винахідником останнього є уродженець Тернопілля Смакула О.Ф. (1900–1983) [110].

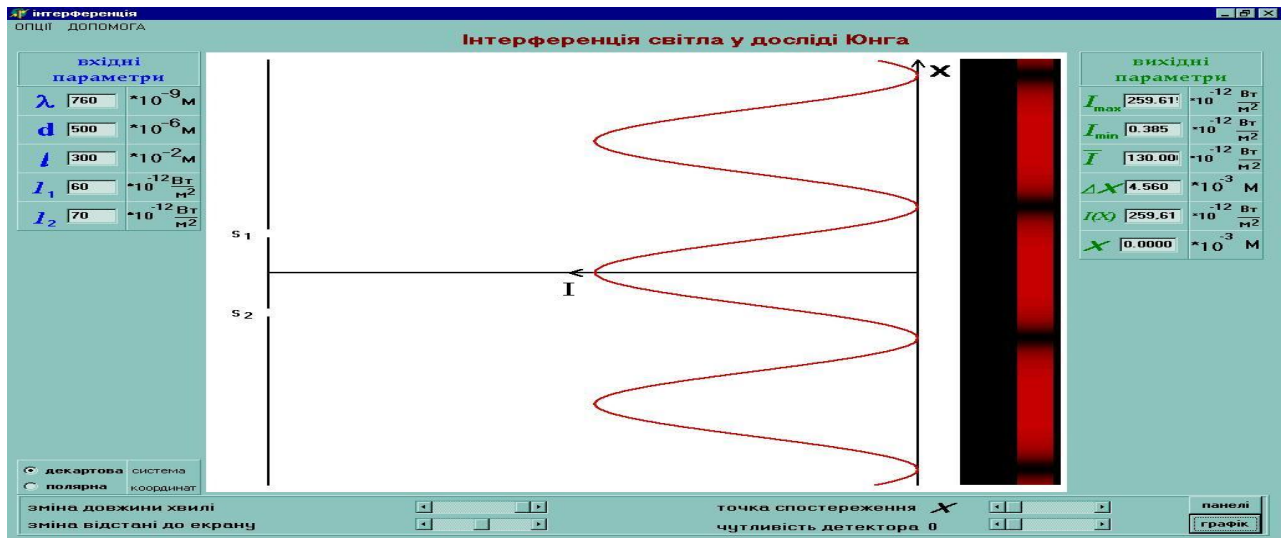


Рис. 2.9.2. Інтерференція світла у досліді Юнга

2. Вивчення дифракції світла доцільно розпочати з аналізу особливостей спостережуваних картин дифракції в окремих областях спостереження. З'ясувавши зміст поняття “дифракція світла”, наголошуємо, що дифракція має місце завжди, коли явище має хвильову природу. Принцип Гюйгенса – Френеля розглядаємо лише як наслідок теорії ЕМХ Максвелла [106, с. 423; 182, с. 384; 55, с. 154; 247, с. 203]. З'ясовуємо обмеженість пізнавальних можливостей принципу Гюйгенса – Френеля. Особливої уваги заслуговує аналіз змісту прямої і оберненої задач теорії дифракції. На цьому ґрунті вивчаємо особливості картин дифракції у наближеннях геометричної оптики, Френеля та Фраунгофера у зв'язку із критичними значеннями параметра теорії дифракції $p = b^2 / \lambda$.

В якості прикладів розв'язування прямої задачі теорії дифракції розглядаємо дифракцію Френеля на круглomu отворі та диску [182, с. 389-392].

Щоб зрозуміти суть методу, розробленого Френелем, визначаємо амплітуду світлового коливання, яке збуджується в точці P сферичною хвилею, яка розповсюджується в ізотропному однорідному середовищі від точкового джерела S (рис. 2.9.3). Хвильові поверхні SX симетричні відносно прямої SP . Виходячи із міркувань симетрії, знаходимо амплітуду результуючого

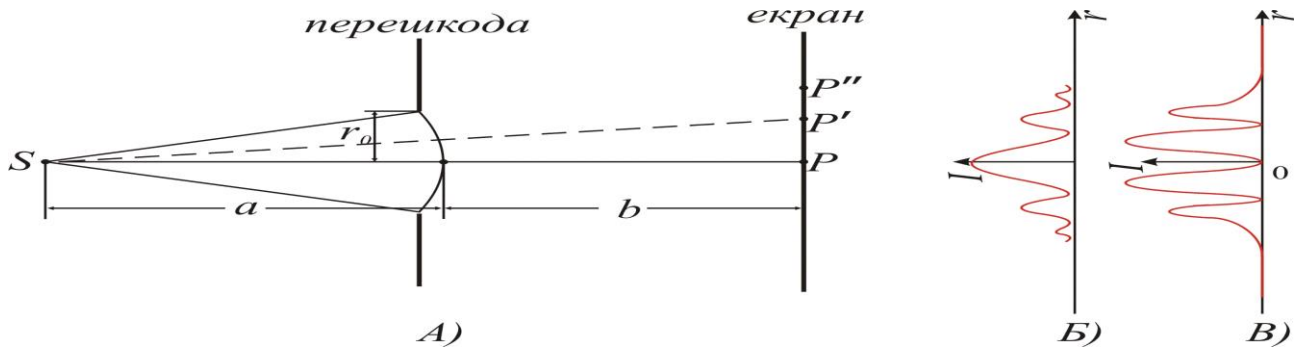


Рис 2.9.3 Дифракція Френеля на круглому отворі

коливання [182, с. 389]. Аналіз показує, що якщо a і b задовольняють співвідношення

$$r_0 = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m \lambda, \tag{2.9.12}$$

де m – ціле число, то отвір залишить відкритим m перших зон Френеля, побудованих для точки P . Отже, кількість відкритих зон Френеля:

$$m = \frac{r_0^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right), \tag{2.9.13}$$

а амплітуда в точці P дорівнюватиме:

$$A = \frac{A_1}{2} \pm \frac{A_m}{2}, \tag{2.9.14}$$

знак «плюс» береться для непарних m і «мінус» - для парних.

З'ясуємо особливості дифракції Фраунгофера на щілині [55, с. 156; 247, с. 200], використовуючи комп'ютерну модель «Дифракція Фраунгофера на щілині» (рис. 2.9.4) [110], як доповнення до реального фізичного експерименту.

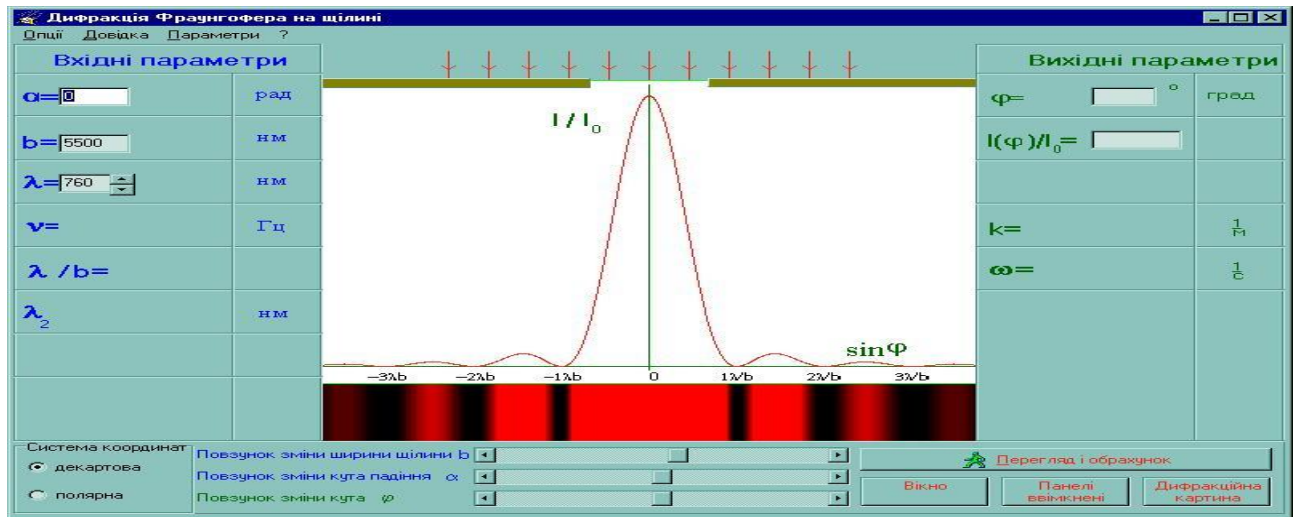


Рис. 2.9.4. Дифракція Фраунгофера на щілині

Отримуємо умови максимумів і мінімумів інтенсивності [182, с. 402]. Якщо різниця ходу ΔCX від країв щілини дорівнює $\pm k\lambda$, відкриту частину хвильової поверхні можна розбити на $2k$ рівних за шириною зон, причому різниця ходу від країв кожної зони дорівнює $\frac{\lambda}{2}$. Коливання від кожної пари сусідніх зон взаємно гасять одне одне, тому результуюча амплітуда дорівнює нулю. Тобто, положення мінімумів інтенсивності:

$$b \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad (k=1,2,3,\dots). \quad (2.9.15)$$

Якщо для точки P різниця ходу Δ дорівнює $\pm(k+\frac{1}{2})\lambda$, кількість зон буде не парною, і дія однієї із них виявиться некомпенсованою, а тому спостерігається максимум інтенсивності:

$$b \sin \varphi = \pm(k+\frac{1}{2})\lambda, \quad (k=1,2,3,\dots). \quad (2.9.16)$$

Дифракційна картина симетрична відносно центра лінзи. Відмічаємо, що при зміщенні щілини паралельно до екрана (вздовж осі Ox), дифракційна картина, що спостерігається на екрані, залишається нерухомою, її середина лежить проти центра лінзи. Детальний аналіз дифракції Фраунгофера на щілині важливий ще й з пропедевтичних міркувань, оскільки його результати використовують у квантовій фізиці під час вивчення корпускулярно-хвильового дуалізму (хвилі де Бройля [55, с. 303; 183, с. 62; 247, с. 331], принцип невизначеностей Гейзенберга [55, с. 311; 183, с. 68; 247, с. 339]).

Краям центрального максимуму відповідають значення кута φ , що знаходяться із умови: $b \sin \varphi = \pm \lambda$. Отже, кутова ширина центрального максимуму

$$\delta \varphi = 2 \arcsin \frac{\lambda}{b}. \quad (2.9.17)$$

Якщо $b \gg \lambda$, значення $\sin \frac{\lambda}{b} = \frac{\lambda}{b}$, і отримуємо:

$$\delta \varphi = \frac{2\lambda}{b}. \quad (2.9.18)$$

Ставимо перед учнями наступну пізнавальну задачу: встановити, використовуючи комп'ютерну модель «Дифракція Фраунгофера на щілині», кількісний критерій, який дозволяє визначити, який вид дифракції має місце в кожному конкретному випадку. Підставляючи різні значення параметрів b, l, λ у комп'ютерну модель «Дифракція Фраунгофера на щілині», учні профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів приходять до висновку, що характер дифракції залежить від параметра $\frac{b^2}{l\lambda}$ [182, с. 406]:

$$\frac{b^2}{l\lambda} \begin{cases} \ll 1 - \text{дифракція Френеля} \\ \sim 1 - \text{дифракція Фраунгофера} \\ \gg 1 - \text{дифракція Френеля} \end{cases}$$

Аналіз параметра $\frac{b^2}{l\lambda}$ показує, що він безпосередньо зв'язаний з кількістю відкритих зон Френеля. Якщо щілина відкриває малу частину центральної зони Френеля ($m \ll 1$), то спостерігається дифракція Фраунгофера, якщо ж невелику кількість зон Френеля – то маємо дифракцію Френеля. Приходимо до висновку, що критерієм застосовності геометричної оптики є не мале значення довжини хвилі в порівнянні з розмірами перешкоди, а значення параметра $\frac{b^2}{l\lambda}$.

Розглядаючи дифракцію Фраунгофера на решітці (рис.2.9.5),

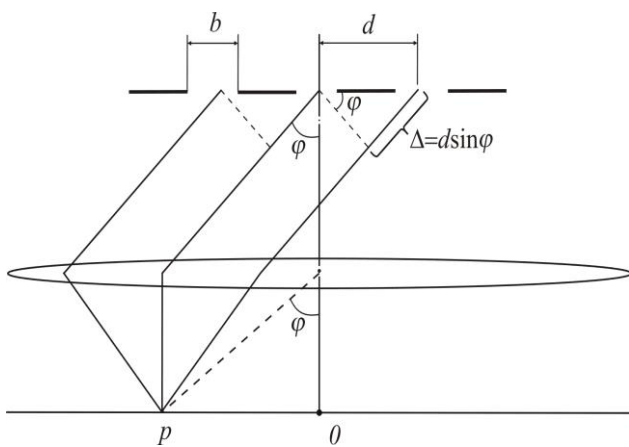


Рис. 2.9.5 Дифракція Фраунгофера на решітці

встановлюємо положення мінімумів інтенсивності [55, с. 161; 182, с. 407]:

$$b \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (k=1,2,3,\dots), \quad (2.9.19)$$

та максимумів інтенсивності:

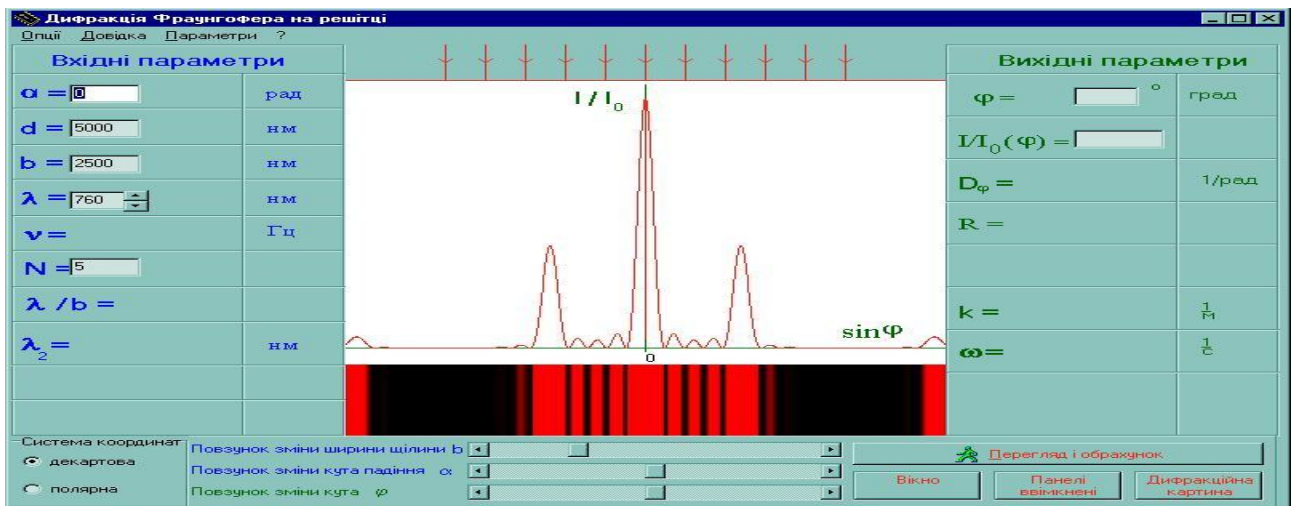
$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (m=1,2,3,\dots). \quad (2.9.20)$$

Підкреслюємо, що розміщення головних максимумів залежить від довжини хвилі λ . Тому при проходженні білого світла через дифракційну решітку

всі максимуми, крім центрального, розкладаються в спектр, фіолетовий кінець якого розміщений до центра дифракційної картини, а червоний – назовні.

З'ясуємо особливості дифракції Фраунгофера на одновимірній періодичній структурі, використовуючи комп'ютерну модель «Дифракція Фраунгофера на решітці» (рис. 2.9.6) [110].

Тут є доцільною побудова індикатрис дифракційного розсіювання, оскільки останнє істотно спрощує розуміння закономірностей дифракції у зв'язку із наявністю наочних опор. В якості практично значущих висновків теорії дифракції розглядаємо обмеження, які дифракція накладає на роздільну здатність об'єктів оптичних приладів та на щільність запису інформації на оптичних носіях, на обмеження, які виникають у зв'язку з дифракцією під час фокусування світлових пучків у лазерних технологіях, тощо. Важливими наслідками теорії дифракції є також дифракційна решітка як спектроскопічний прилад та дифракція X – випромінювання на кристалах. Варто наголосити на



пріоритетах українців у відкритті і з'ясуванні властивостей X – випромінювання (І.П.Пулюй) [110].

Рис. 2.9.6. Дифракція Фраунгофера на решітці

3. Дуже важливо у методичному плані повернутися до розгляду інтерференції і дифракції світла при вивченні атомної фізики учнями профільних (фізичних, фізико – математичних, фізико – технічних) класів.

Відмічаємо, що явища інтерференції і дифракції світла пояснюються на основі хвильових уявлень. Але існує ряд явищ, в яких світло веде себе як потік частинок – фотонів. Фотон – квант електромагнітного поля (ЕМП), для нього не може бути інерціальної системи відліку (ІСВ), у якій він перебуває в стані спокою, ЕМП розповсюджується із швидкістю c у будь-якій (ІСВ) [55, с. 279].

Отже, для світла властивий *корпускулярно-хвильовий дуалізм*. Корпускулярно-хвильовий дуалізм властивий не тільки світлу, але і частинкам (електронам, протонам, атомам) [55, с. 288; 247, с. 331].

Аналізуємо досліди Томсона і Тартаковського по проходженню електронного пучка через металічну фольгу [183, с. 64]. Відмічаємо, що розсіяні пластинкою електрони демонструють картину дифракційних кілець. Тому досліди по дифракції електронів служать доказом існування у електрона хвильових властивостей.

У такий спосіб підводимо учнів до гіпотези Луї де Бройля [183, с. 62], згідно якої мікрооб'єкт має властивості не тільки корпускули, але і хвилі. Його корпускулярні характеристики (енергія ε , імпульс p) зв'язані з хвильовими характеристиками (частотою ω і довжиною хвилі λ) співвідношеннями:

$$\varepsilon = \hbar\omega, \quad p = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}. \quad (2.9.21)$$

Використовуємо гіпотезу де Бройля для пояснення співвідношення невизначеностей [183, с. 69; 247, с. 341]. Для цього знаходимо значення координати x мікрочастинки, поставивши на її шляху щілину шириною Δx , розміщену перпендикулярно до напрямку руху частинки (рис.2.9.7).

До проходження частинки через щілину її складова імпульсу p_x має точне значення, рівне нулю, але координата x невизначена. В момент проходження частинки через щілину замість повної невизначеності координати x появляється невизначеність Δx , але втрачається визначеність значення p_x . Внаслідок дифракції існує ймовірність того, що частинка буде рухатися в межах кута 2φ , де φ – кут який відповідає першому дифракційному мінімуму. Отже, появляється невизначеність: $\Delta p_x = p \sin \varphi$. Краю центрального дифракційного

максимуму (першому мінімуму), що отримується від щілини шириною Δx , відповідає кут φ , для якого $\sin\varphi = \frac{\lambda}{\Delta x}$. Отже, $\Delta p_x \sim p \frac{\lambda}{\Delta x}$. Звідки, врахувавши довжину хвилі де Бройля (2.9.21), отримуємо:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (2.9.22)$$

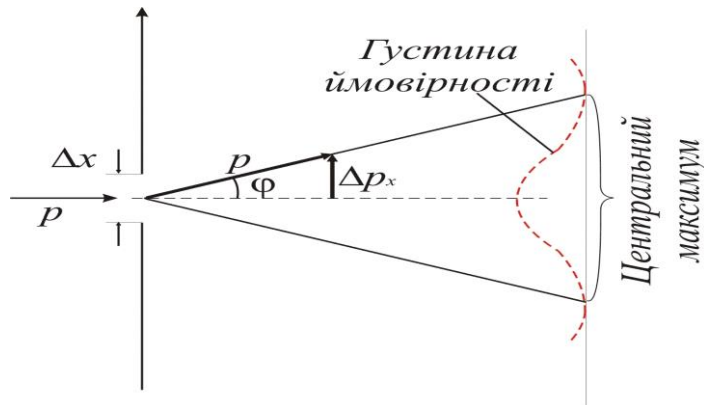


Рис.2.9.7

Співвідношення невизначеностей Гейзенберга (2.9.22) вказує, в якій мірі можна користуватися поняттями класичної механіки стосовно до мікрооб'єктів, в частковому випадку, з якою точністю можна говорити про траєкторії мікрочастинок [183, с. 68].

В мікросвіті інтерференція і дифракція можливі за відсутності хвиль. Вони є наслідком особливих правил додавання для ймовірностей.

Підводимо учнів до висновку, що стан мікрооб'єкта в якому x – проекція імпульсу має значення p_0 , а x – координата не має визначеного значення, описується хвильовою функцією $\Psi_{p_0}(x)$, квадрат модуля якої є густина ймовірності того, що розглядуваний мікрооб'єкт буде виявлено в точці x . Підкреслюємо що результат вимірювання координати мікрооб'єкта в стані $\Psi_{p_0}(x)$ виявляється завжди випадковим. Те чи інше значення координати реалізується з густиною ймовірності $|\Psi_{p_0}(x)|^2$ [183, с. 75].

Розглядаємо інтерференцію фотонів на двох щілинах (рис. 2.9.8), [183, с. 67]. Припускаємо що щілина 1 закрита, а щілина 2 відкрита. Зареєструвавши достатньо велику кількість мікрооб'єктів, ми отримаємо на екрані розподіл, зображений на (рис 2.9.8 б) графіком 2, що описується функцією $\omega_2(x)$. Ця функція є ймовірність попасти мікрооб'єкту, який пройшов через другу щілину (при закритій першій) в точку x : $\omega_2(x) = |\Psi_2(x)|^2$, де $\Psi_2(x)$ є хвильова функція яка

описує мікрооб'єкт який пройшов через щілину 2 – її називають *амплітудою ймовірності* або *амплітудою густини ймовірності*.

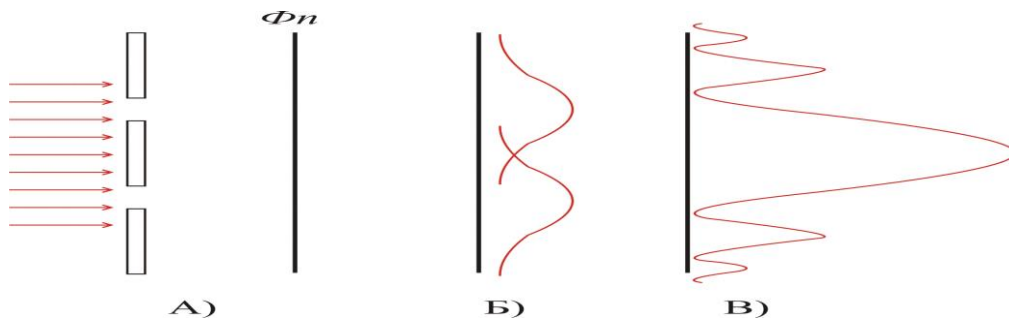


Рис. 2.9.8 Інтерференція фотонів на двох щілинах

Аналогічно при закритій другій щілині, на екрані буде розподіл $\omega(x)=|\Psi_1(x)|^2$, де $\Psi_1(x)$ – амплітуда ймовірності попадання в точку x для мікрооб'єкта, який пройшов через щілину 1 (при закритій другій).

Відкриваємо обидві щілини. При цьому на екрані спостерігається типовий інтерференційний розподіл, який не є сумою двох вище вказаних розподілів. Підводимо учнів до одного із основних висновків квантової механіки: якщо альтернативи різні, то відповідні їм ймовірності додаються; якщо ж альтернативи не відрізняються, то додаються не ймовірності, а амплітуди ймовірностей. Тобто, при відкритих двох щілинах отримуємо розподіл

$$\omega(x)=|\Psi_1(x)+\Psi_2(x)|^2. \quad (2.9.23)$$

Цей розподіл має інтерференційний характер:

$$|\Psi_1(x)+\Psi_2(x)|^2=|\Psi_1(x)|^2+|\Psi_2(x)|^2+\left[\frac{\Psi_1(x)}{\Psi_2(x)}|\Psi_2(x)|^2+\frac{\Psi_2(x)}{\Psi_1(x)}|\Psi_1(x)|^2\right]. \quad (2.9.24)$$

Вираз, який стоїть у квадратних дужках і відповідає за інтерференційний характер розподілу $\omega(x)$. Отже, явище інтерференції не слід обмежувати границями хвильових уявлень. Інтерференція в мікросвіті не обов'язково зв'язана з хвилями, вона є наслідком ймовірнісних законів, а точніше, наслідком того, що для подій, які не відрізняються, потрібно додавати не ймовірності, а їх амплітуди. Отже, величини, які квадратично залежать від амплітуд ЕМП, інтерпретуються як ймовірності. Ми можемо застосовувати до розповсюдження фотонів у просторі рівняння Максвелла, але класично

обраховані густина енергії або її потік інтерпретуються нами по – новому – як середні значення, які спостерігаються з великою кількістю фотонів. Тому в тих дослідах, де ми вимірюємо середні значення і не спостерігаємо окремі фотони, класична теорія цілком вірна. При спостереженні окремих фотонів, наприклад з допомогою фотоелемента, стає очевидною обмеженість класичної теорії.

4. Вивчення розділу завершується розглядом питань, які мають пряме відношення як до релятивістської, так і до квантової фізики. Учні повинні усвідомити, що передача інформації пов'язана з поширенням хвильових пакетів і що СТВ накладає обмеження саме на швидкість поширення хвильових пакетів (групова швидкість), а не на швидкість поширення монохроматичних хвиль (фазова швидкість). Окрім того, без глибокого розуміння принципу невизначеностей та співвідношень невизначеностей, яким підлягають хвильові пакети, навряд чи може бути успішним з'ясування змісту принципу та співвідношень невизначеностей Гейзенберга у квантовій фізиці [183, с. 71]. Тому властивостям хвильових пакетів ЕМХ повинна бути приділена особлива увага. Аналогічне зауваження стосується і ефекту Доплера, який є чи не найбільш наочним проявом законів релятивістської фізики – СТВ [247, с. 159]. Отже, розроблений методичний підхід формування ФФП у процесі вивчення оптики в учнів профільних класів із використанням сучасних інформаційних технологій включає наступні етапи (рис. 2.9.9).

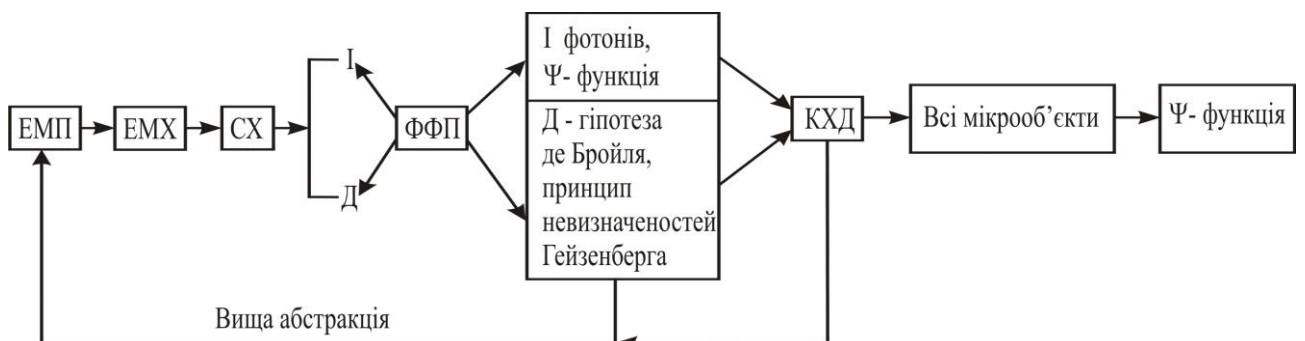


Рис. 2.9.9 Формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення світлових хвиль

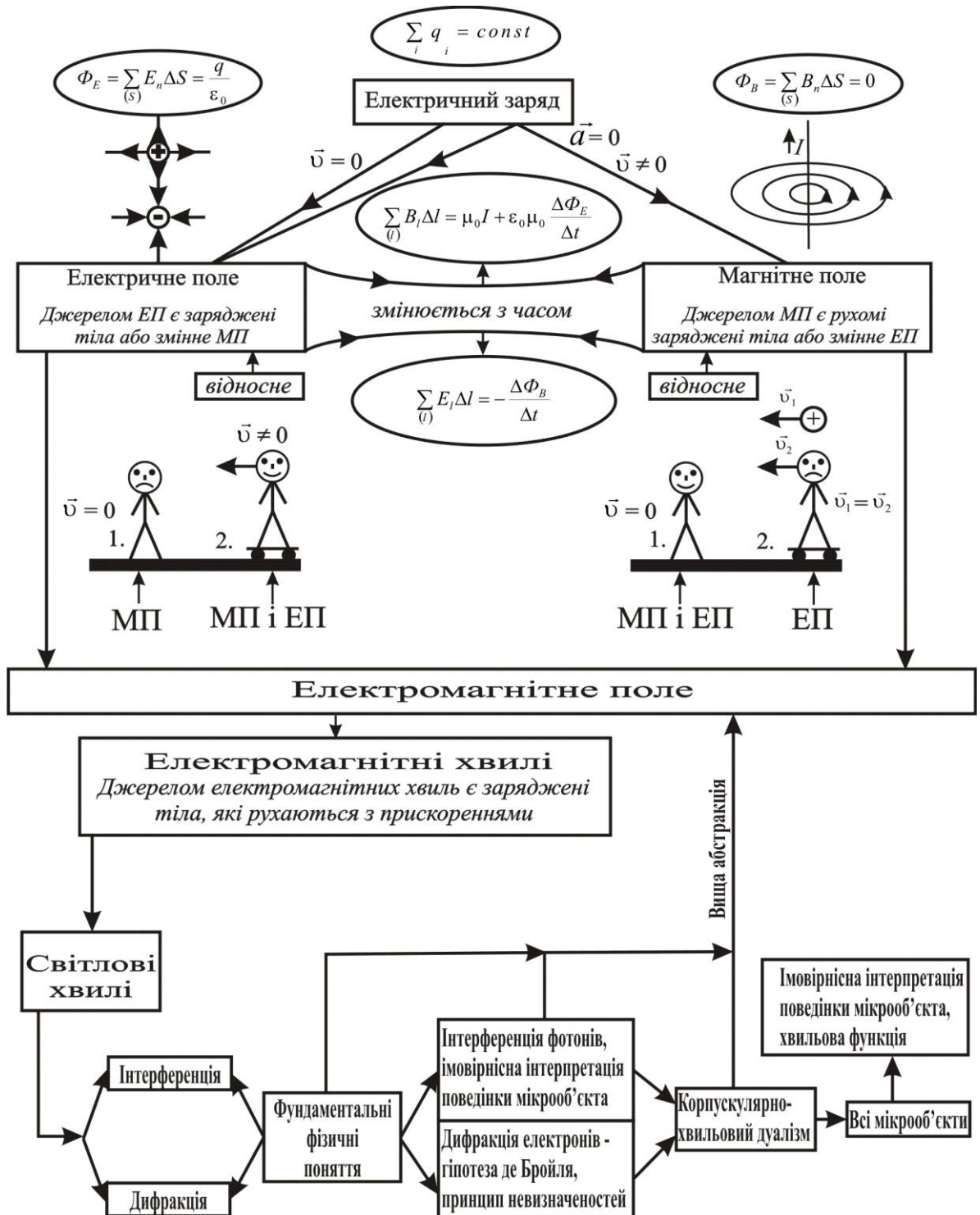
При реалізації запропонованого підходу в учнів формується цілісне уявлення про світлову хвилю як хвилю електромагнітну. Вони бачать обмеженість хвильових уявлень і необхідність їх розвитку для пояснення дискретних властивостей світла. Слід відмітити, що система ФФП (симетрія, взаємодія, відносність, ймовірність, невизначеність, фотон) служить в якості засобу для засвоєння матеріалу розділу «Оптика» у світлі сучасних фізичних теорій для профільних класів старшої школи. Саме тут виникають передумови для побудови квантової моделі електромагнітного випромінювання без логічного конфлікту із знаннями, здобутими учнями раніше.

Таким чином, розроблена вище методика викладання розділу «Світлові хвилі» на основі ФФП із використанням сучасних інформаційних технологій дозволяє структурувати навчальний матеріал розділу, створює можливості для глибшого й аргументованішого вивчення теорії відносності та квантової фізики. Запропонована методика викладання навчального матеріалу сприяє розвитку в учнів наукового мислення та формування цілісної фізичної картини світу. (рис. 2.9.10.), систематизує знання учнів профільних класів про теорію електромагнітного поля на основі ФФП та сучасних фізичних уявлень.

Фундаментальні поняття служать основою для систематизації і обґрунтування внутріпредметних і міжпредметних зв'язків. В таблиці 2.3. приведено фрагмент програми з фізики [172]. В першому стовбці перелічені питання, інтерпретація яких передбачає використання елементної бази відповідних фундаментальних фізичних понять. У другому стовбці – розкрито логіку зв'язку змістового матеріалу з відповідним фундаментальним фізичним поняттям. В такий спосіб, не збільшуючи передбачений програмою бюджет часу на вивчення фізики у профільних класах, вдається глибше розкривати зміст традиційного матеріалу фізики і самих фундаментальних понять.

Якщо виходити з положення про те, що єдність формування наукового світогляду і фізичної картини світу (ФКС) досягається через засвоєння системи їх принципів [172], об'єднання матеріалу навколо стрижневих ідей сучасної фізичної науки, то формування фундаментальних понять симетрії, ймовірності,

невизначеності, відносності, не тільки є необхідним елементом формування сучасної ФКС, але сприяє такій організації навчального матеріалу з фізики, при якій найбільш повно розкривається структура і логіка сучасної фізичної науки,



статус понять і законів, формування наукового світогляду.

Рис. 2.9.10. Структурна схема вивчення розділу «Електродинаміка» (профільний рівень) на основі фундаментальних фізичних понять

Проведені нами експериментальні дослідження показали доцільність такого методичного підходу, в якому б поєднувалися дві взаємозв'язані лінії структурування навчального матеріалу для профільних класів – на основі фундаментальних фізичних принципів і фундаментальних фізичних понять. Перша з них передбачає цілісний розгляд об'єктів і явищ як стосовно їх внутрішньої природи, так і методів пізнання. Друга – цілеспрямоване формування на основі повсякденних уявлень таких понять – елементів і понять – комплексів, які визначають індуктивні основи фізичних теорій.

Таблиця 2.3.

Зв'язки програмового матеріалу розділу «Електродинаміка»
(профільний рівень) з фундаментальними фізичними поняттями

Зміст програмового матеріалу розділу «Електродинаміка» (профільний рівень)	Зв'язок з відповідним фундаментальним поняттям
1	2
<p>1. Електрична і магнітна взаємодії. Взаємодія провідників зі струмом. Індукція магнітного поля. Потік магнітної індукції. Дія магнітного поля на провідник зі струмом. Сила Ампера. Взаємодія струмів. Дія магнітного поля на рухомі заряджені частинки. Сила Лоренца. Рух зарядженої частинки в однорідному полі. Закон Біо-Савара-Лапласа.</p>	<p>Зв'язок симетрія – явище; симетрія поля; принцип відносності; c – фундаментальна стала; спосіб передачі взаємодії; фундаментальні взаємодії.</p>
<p>2. Електромагнітна індукція. Досліди М.Фарадея. Напрямок індукційного струму. Правило Ленца. Закон електромагнітної індукції. Самоіндукція. ЕРС самоіндукції. Індукційне електричне поле. Вихрові струми. Індуктивність. Енергія магнітного поля котушки зі струмом. Взаємозв'язок електричного і магнітного полів як прояв єдиного електромагнітного поля.</p>	<p>Проблема існування взаємозв'язку магнітного і електричного полів. Симетрія законів електродинаміки. Симетрія. Збереження. Взаємообумовленість явищ. Симетрія математичних рівнянь і фізична суть явищ.</p>
<p>3. Коливальний контур. Виникнення електромагнітних коливань у коливальному контурі. Перетворення енергії в коливальному контурі. Утворення і поширення електромагнітних хвиль. Гіпотеза Дж.Максвелла. Досліди Г.Герца. Швидкість поширення, довжина і частота електромагнітної хвилі. Ефект Х.Доплера. Шкала електромагнітних</p>	<p>Зв'язок симетрія – явище; симетрія поля; принцип відносності; c – фундаментальна стала; спосіб передачі взаємодії; фундаментальні взаємодії.</p>

хвиль. Властивості електромагнітних хвиль різних діапазонів частот.	
<p>4. Світло як електромагнітна хвиля. Когерентність світлових хвиль. Інтерференція світла. <i>Інтерферометр А.Майкельсона.</i></p> <p>Дифракція світла. <i>Зони Френеля.</i> Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракційні картини від щілини, тонкої нитки. Дифракційна ґратка. Спектроскоп. Поляризація світла.</p>	<p>Суть фізичного явища – модель; симетрія – явище; геометричні і внутрішні симетрії; принцип симетрії Кюрі; введення хвильової моделі на основі виявленої симетрії.</p>

Продовження таблиці 2.3.

1	2
<p>4. Квантові властивості світла. Гіпотеза М.Планка. Світлові кванти. Стала Планка. Маса, енергія та імпульс фотона. Тиск світла. <i>Дослід Лебедева. Ефект А.Комптона. Дослід В.Боте.</i></p> <p>Фотоефект. Досліди О.Г.Столетова. Закони зовнішнього фотоефекту. Рівняння фотоефекту. Квантові генератори та їх застосування. Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла. <i>Гіпотеза де Бройля. Хвильові властивості частинок. Поняття про квантову механіку.</i></p>	<p>Симетрія рівнянь – гіпотеза квантування; симетрія – збереження; фундаментальна частинка – фотон; спосіб квантової взаємодії і симетрія поля; невизначеність; корпускулярно – хвильовий дуалізм й імовірнісна поведінка мікрооб'єктів; принцип відповідності.</p>
<p>5. Релятивістська механіка (10 клас).</p> <p>Принцип відносності А.Ейнштейна. Основні положення спеціальної теорії відносності (СТВ). <i>Перетворення Лоренца.</i> Швидкість світла у вакуумі. Відносність довжини і часу. Відносність одночасності подій. Релятивістський закон додавання швидкостей. Закон взаємозв'язку маси та енергії. <i>Основні наслідки СТВ та їх експериментальні підтвердження.</i></p>	<p>Принцип відносності Галілея і Ейнштейна c – фундаментальна константа; межі застосування класичної механіки і електродинаміки; маса і енергія спокою; взаємозв'язок маси і енергії; фізичні закони і симетрія простору – часу.</p>

Висновки до другого розділу

На основі узагальнення результатів другого розділу дисертаційного дослідження можна зробити наступні висновки:

1) відібрано з класичної та квантової електродинаміки змістовний матеріал фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, електричний заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія та ін.) та розроблено методику його використання у процесі вивчення розділу «Електродинаміка» для профільних класів загальноосвітніх навчальних закладів на основі методології сучасної фізики;

2) запропоновано, обґрунтовано і розроблено методику формування системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, фотон та ін.) в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка», яка будується на основі конструктивного та системного підходів та полягає у їх конструюванні як теоретичних узагальнень при збереженні емпіричної основи – повсякденних уявлень;

3) удосконалено методичну модель процесу формування системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, фотон та ін.) в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка», яка враховує інформаційний підхід та сучасні психолого-педагогічні дослідження процесу

наукового пізнання;

4) запропоновано, обґрунтовано і розроблено методика вивчення розділу «Електродинаміка» на основі системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, електромагнітна хвиля, фотон та ін.) для учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів, у якій при побудові структурно-логічних схем вивчення всіх підрозділів чільне місце займають фундаментальні фізичні поняття та ідеї сучасної фізичної науки, як основні структурні одиниці змісту розділу «Електродинаміка» для профільних класів;

5) отримали подальший розвиток ідеї, що об'єднуючою основою при вивченні всіх тем електродинаміки можуть служити поняття електромагнітного поля (С.Є. Каменецький) та електромагнітної взаємодії (В.В.Мултановський), адаптовані до сприйняття учнями профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів, а саме: формування понять електромагнітного поля та електромагнітної взаємодії на основі фундаментальних фізичних понять «симетрія», «відносність», «поле», «взаємодія», створює передумови для побудови квантової моделі електромагнітного випромінювання без логічного конфлікту із знаннями, здобутими учнями під час вивчення розділу «Електродинаміка»;

б) здійснено генералізацію та систематизацію розділу «Електродинаміка» для учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів на основі системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, електромагнітна хвиля, фотон та ін.).

РОЗДІЛ III

ОРГАНІЗАЦІЯ, МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ПЕДАГОГІЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Експертні оцінки навчальних матеріалів із методики формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки.

Розроблена теоретично і оптимізована в результаті експерименту методика формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки була піддана експертній оцінці двома незалежними групами експертів – викладачів кафедри фізики і методики викладання фізики ТДПУ, (умовно – група А) і вчителями середніх шкіл (умовно – група В). Експертиза проводилась після детального ознайомлення потенційних експертів з дидактичними матеріалами по методиці формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки, а також після проведення занять для групи В. В якості головної мети розглядалось отримання об'єктивної оцінки потенціальної дидактичної ефективності розробленої методики формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки.

Експертиза проводилась на основі анкетування, розробленого у відповідності з рекомендаціями [38; 39; 65; 140; 226], (А.1. Анкета 1, Анкета 2 “Додатку А”). Важливими вимогами до експертів були їх компетентність і об'єктивність. Компетентність потенціальних експертів групи А підтверджувалася їх науковими працями, зв'язаними з розглядуваною проблемою. Компетентність потенційних експертів групи В визначалась на основі аналізу їх відповідей на питання анкети, яка пропонувалась їм до ознайомлення з експериментальною методикою навчання, щоб визначити її вплив на результати анкетування. Із анкетованих 60 чоловік в якості компетентних по розглядуваній проблемі було відібрано 43 чоловік.

Анкета, запропонована компетентним експертам після детального

ознайомлення з експериментальною методикою, включала питання, які вимагали провести оцінку значущості окремих дидактичних властивостей пропонуваної методики формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки за двома різними, але взаємозв'язаними шкалами: шкала “ранг критерію” – високій значущості властивості (критерію оцінювання) відповідає низький ранг ($1 \leq Q \leq 6$); шкала “відносна значущість критерію” – високій значущості властивості відповідає його висока відносна значущість ($0 \leq Z_i \leq 10$; $\sum_{i=1}^6 Z_i = Z = 10$). Якщо в результаті анкетування виявлялась невідповідність рангу критерію його відносній значущості, то експерт – автор відповідей на питання анкети розглядався як необ'єктивний і його оцінки в подальшому до уваги не приймалися. В групі А всі експерти дали об'єктивні відповіді, тоді як в групі В необ'єктивними виявились 7 чоловік.

В результаті, групи експертів А і В, визнаних компетентними і об'єктивними по розглядуваній проблемі, були сформовані із $n^A=11$ і $n^B=32$ чоловік відповідно.

Сукупність критеріїв, за якими проводилось оцінювання розробленої методики, формувались аналогічно з [7]. Але ми вважали за доцільне оцінювання навчальних, виховних і розвиваючих структур ФФП проводити окремо. При формуванні системи критеріїв ми виходили також із того, що їх кількість m для забезпечування об'єктивності оцінювання повинна бути 7 ± 2 / $5 \leq m \leq 9$ / [7].

Для того, щоб не нав'язувати своєї думки про значущість тієї чи іншої властивості (рангу або відносної значущості критерію) експертам, порядок розміщення критеріїв в анкеті 2 був довільним. Якщо б розкид рангів Q_{ij} або відносних значущостей Z_{ij} , присвоєних експертами тому чи іншому критерію виявився великим, а коефіцієнт конкордації низьким ($W < 0,3$), ми припускали ознайомити експертів з власною думкою і зробити спробу досягнути бажаної згоди по розглядуваних питаннях [140]. Але, ступінь погодженості відповідей виявилось достатньо високою ($W \geq 0,7$).

Результати експертних оцінок рангу і відносної значущості критеріїв оцінювання наведені в таблицях А.2 (група А) і А.3 (група В) “Додатку А”. В відповідності з [140] найбільш низький ранг ($Q=1$) присвоюється критерію, який набрав мінімальну рангову суму; найвищий ранг ($Q=6$) має критерій з максимальною ранговою сумою. В подальшому використовуємо наступну потрібну індексацію: Q_{ij}^A (Q_{ij}^B) – ранг, присвоєний і-у критерію j-м експертом групи А(В), ($1 \leq Q_{ij} \leq 6$); Z_{ij}^A (Z_{ij}^B) – відносна значущість і-го критерію на думку j-го експерта групи А(В), ($0 \leq Z_{ij} \leq 1$).

Нумерація по індексу і проводиться у відповідності з підсумковим рангом критерію, так що Q_{ij} (Z_{ij}) – ранг (відносна значущість) критерію, що має підсумковий ранг і, присвоєний йому j-м експертом.

В силу зроблених зауважень:

$$1 \leq i \leq m=6; \quad 1 \leq j^A \leq n^A=11; \quad 1 \leq j^B \leq n^B=32, \text{ причому}$$

$$Q_{.j} = \sum_{i=1}^m Q_{ij}^A = \sum_{i=1}^m Q_{ij}^B = 21; \quad Z_{.j} = \sum_{i=1}^m Z_{ij}^A = \sum_{i=1}^m Z_{ij}^B = 100$$

Як впливає із таблиці А.2 “Додатку А”, результати рангування критеріїв групою експертів А добре узгоджується з результатами оцінювання їх відносної значущості (таблиця 3.1).

Погодженість думок експертів групи А висока, що наглядно демонструє графік залежності $Q_{.j} = Q_{.j}(i)$ (лінія, яка дуже мало відрізняється від прямої $Q_{.j} \sim i$), і що підтверджується обчисленням коефіцієнта конкордації W за методикою М.Кендалла [140] ($W^A=0,84 > 0,7$). Відповідний графік і обчислення наведено в А.4 “Додатку А”.

Згідно таблиці А.3 “Додатку А” маємо наступні результати рангування і оцінки відносної значущості критеріїв експертами групи В (таблиця 3.2).

Погодженість думок експертів групи В середня (графік залежності $Q_{.j} = Q_{.j}(i)$ відрізняється від прямої), коефіцієнт конкордації $W^B=0,7$ [А.5 “Додатку А”]. Звертаємо увагу, що рангові суми критеріїв б) і д) ($Q_{z.}^B$ і $Q_{3.}^B$) відрізняються дуже мало. Крім того, при $Q_{z.}^B < Q_{3.}^B$ має місце $Z_{z.}^B < Z_{3.}^B$, що

свідчить про те, що група експертів В вважає однаково важливою відповідність розробленої методики критеріям б) і д).

Таблиця 3.1

Результати ранжування і визначення відносної значущості критеріїв оцінювання методики вивчення електродинаміки експертами групи А.

Критерій	Е	Б	Г	Д	В	А
Рангова сума критерію (Q_i^A)	11	27	34	42	53	64
Кінцевий ранг критерію (i^A)	1	2	3	4	5	6
Відносна знач. критерію (Z_1^A)	30,9	21,36	15,45	14,54	10,09	7,63

Таблиця 3.2

Результати ранжування і визначення відносної значущості критеріїв оцінювання методики вивчення електродинаміки експертами групи В.

Критерій	Е	Б	Г	Д	В	А
Рангова сума критерію (Q_i^B)	36	93	96	113	162	172
Кінцевий ранг критерію (i^B)	1	2	3	4	5	6
Відносна знач. критерію (Z_1^B)	32,81	18,96	19,37	14,06	7,96	6,81

Експерти обох груп найбільш важливою властивістю розробленої методики вважають можливість розвивати з її допомогою в учнів науково – теоретичного типу мислення (підсумковий ранг критерію $i_e^A = i_e^B = 1$; відносна значущість критерію $\bar{Z}_1^A = 30,9$ і $\bar{Z}_1^B = 32,81$).

В якості важливої властивості розробленої методики експерти відмічають можливість використовувати її для управління процесом засвоєння конкретно – наукових знань (навчаюча функція). Цій властивості експерти обох груп присвоюють ранг 2 ($i_s^A = i_s^B = 2$) при відносній значущості $\bar{Z}_2^A = 21,36$; $\bar{Z}_2^B = 18,96$.

Роль ергономічних і естетичних властивостей (критерії в) і а) оцінюються

експертами обох груп істотно нижче, в зв'язку з чим вони надають їм відповідно ранги 5 і 6 ($i_b^A = i_b^B = 5$; $i_a^A = i_a^B = 6$) при відносних значущостях $\bar{Z}_5^A = 1,009$ $\bar{Z}_5^B = 7,96$ $\bar{Z}_6^A = 7,63$ $\bar{Z}_6^B = 6,81$.

Разом з тим, експерти груп А і В присвоюють різні ранги критеріям д) і г), при відповідності яким методика формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки та використання її в навчанні дозволяє знайомити учнів з методами наукового пізнання, формувати у них вміння застосовувати ці методи на практиці (д) і дозволяє виховувати в учнів ціннісно – значуще відношення до фізичних явищ (г). На думку експертів групи А критерій (д) є більш важливим, тоді як експерти групи В мають протилежну думку. Але, приймаючи до уваги, що в межах однієї групи експертів А або В рангові суми Q_{\cdot} критеріїв (г) і (д), а також їх відносні значущості відрізняються мало, ми повинні зробити висновок про їх малу статистичну відмінність і визнати, що засвоєння методологічних знань і виховання в учнів ціннісно– значущого відношення до фізичних явищ на основі ФФП вважається дослідниками (А) і вчителями (В) практично однаково важливими.

В справедливості цього висновку можна переконатися і іншим шляхом: ступінь погодженості думок експертів груп А і В у зв'язку з рангуванням критеріїв можна оцінити, визначивши коефіцієнт рангової кореляції Спірмена [140, с. 134]. Обчислення, наведені в А.6 “Додатку А”, дають значення $\rho_{AB} = 0,95$. Тобто, має місце сильний прямий зв'язок між думками експертів груп А і В, а виявлена різниця рангів, присвоєних експертами груп А і В критеріям (г) і (д), не є суттєвою.

Отже, можна зробити висновок, що використання в навчанні розробленої методики формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки повинно сприяти в першу чергу розвитку в учнів науково-теоретичного типу мислення, ціленаправленому засвоєнню конкретно-наукових знань, формуванню умінь використовувати методи наукового пізнання і ціннісно-значуще відношення до фізичних явищ, а також

забезпечувати економію часу при вивченні електродинаміки.

Щоб визначити, якій із альтернативних методик вивчення шкільного курсу електродинаміки, традиційній чи експериментальній, що базується на ФФП, слід віддати перевагу, вони були піддані експертному оцінюванню з метою визначення їх відповідності раніше прорангованим критеріям, тобто, визначалася вираженість у них характерних для оптимальної структури властивостей. Оцінювання проводилось по прямій лінійній 10-бальній шкалі. Оцінки відповідності критерію K_{ij}^A і K_{ij}^B , надані і-му критерію j-м експертом груп А і В подані в таблицях А.6 і А.7 “Додатку А”.

Результати експертизи демонструють низьку задоволеність експертів обох груп традиційною методикою вивчення шкільного курсу електродинаміки ($3,8 \leq \overline{K_{1(T)}^A} \leq 5,63$ $3,62 \leq \overline{K_{1(T)}^B} \leq 4,34$), причому відповідність критерію 1 (розвиток науково – теоретичного типу мислення) оцінюється як $\overline{K_{1(T)}^A} = 3,81$ і $\overline{K_{1(T)}^B} = 4,14$: традиційна методика не дозволяє ефективно розвивати мислення. Аналогічно традиційна методика вивчення електродинаміки має обмежені можливості в плані ціленаправлених наукових ($\overline{K_{2(T)}^A} = 4,87$; $\overline{K_{2(T)}^B} = 4,06$) і виховних ($\overline{K_{3(T)}^A} = 5,63$ $\overline{K_{4(T)}^B} = 3,68$) впливів.

З другого боку, експериментальна методика формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки за всіма критеріями оцінюється достатньо високо ($6,8 \leq \overline{K_{1(e)}^A} \leq 9,09$ $7,96 \leq \overline{K_{1(e)}^B} \leq 9,71$), причому відповідність критерію 1 оцінюється як найбільш висока ($\overline{K_{1(e)}^A} = 9,09$ $\overline{K_{1(e)}^B} = 9,71$); експериментальна структура шкільного курсу електродинаміки на основі ФФП на думку експертів повинна дозволяти ефективно розвивати мислення науково – теоретичного типу. Крім того, так як її навчальні і виховні можливості оцінюються також достатньо високо ($\overline{K_{2(e)}^A} = 8,27$ $\overline{K_{2(e)}^B} = 8,65$ і $\overline{K_{3(e)}^A} = 7,45$, $\overline{K_{4(e)}^B} = 8,96$), то це дозволяє припустити, що використання розробленої методики формування ФФП в учнів

профільних класів у процесі вивчення електродинаміки повинно мати комплексний дидактичний вплив на учнів.

Порівняємо комплексну дидактичну ефективність традиційної і експериментальної методики вивчення електродинаміки, визначивши в відповідності з методикою їх “дидактичну якість” D – інтегральну оцінку

$$\text{дидактичної ефективності: } D = \frac{\sum_{i=1}^m K_i \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^m Z_i} = \frac{\sum_{i=1}^m K_i \cdot Z_i}{Z} = \sum_{i=1}^m K_i \frac{Z_i}{Z} = \sum_{i=1}^m C_i K_i;$$

де K_i – усереднена оцінка відповідності методики формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки i -у критерію ($1 \leq i \leq m=6$); Z_i – усереднена відносна значущість i -го критерію; $Z_i/Z = Z_i/100 = C_i$ – статистична вага i -го критерію.

Результати обчислень, виконані на основі оцінок експертів групи А, подано в таблицях А.8 і А.9 “Додатку А”. Результати обчислень, виконані на основі оцінок експертів групи В, подано там же в таблицях А.11 і А.12. Користуючись цими результатами, будуюмо діаграми дидактичної якості, які ілюструють відповідність розробленої методики викладання шкільного курсу електродинаміки на основі ФФП критеріям оцінювання (рис. 3.1, 3.2).

Для дидактичної якості традиційної і експериментальної методики викладання шкільного курсу електродинаміки маємо відповідно:

$$D_T^A = 4,74 \qquad D_E^B = 8,30$$

$$D_T^B = 3,95 \qquad D_E^B = 9,09$$

Отже, розроблена методика на думку експертів обох груп потенційно має більш високу дидактичну ефективність.

Порівняємо зважені результуючі ранги експериментальної і традиційної методики викладання електродинаміки [140, с. 130 – 132].

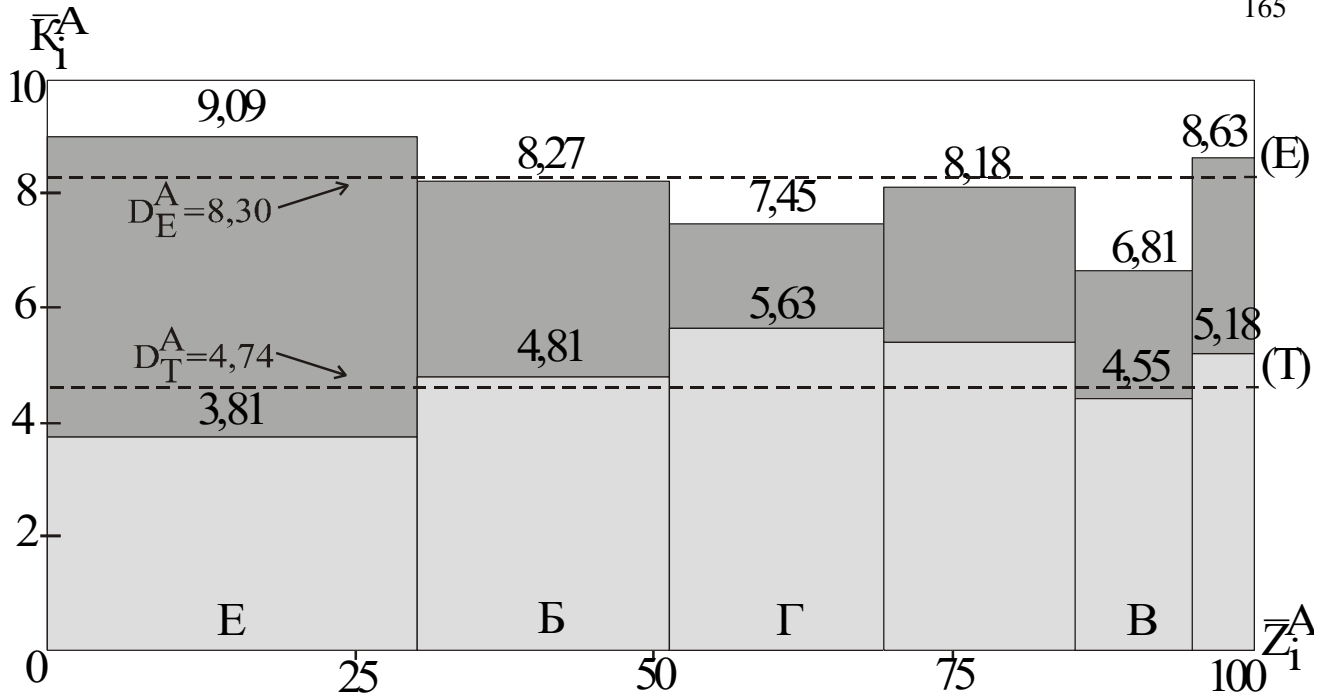


Рис. 3.1. Діаграма “дидактичної якості” методики вивчення електродинаміки традиційної (Т) і експериментальної (Е) (група експертів А).

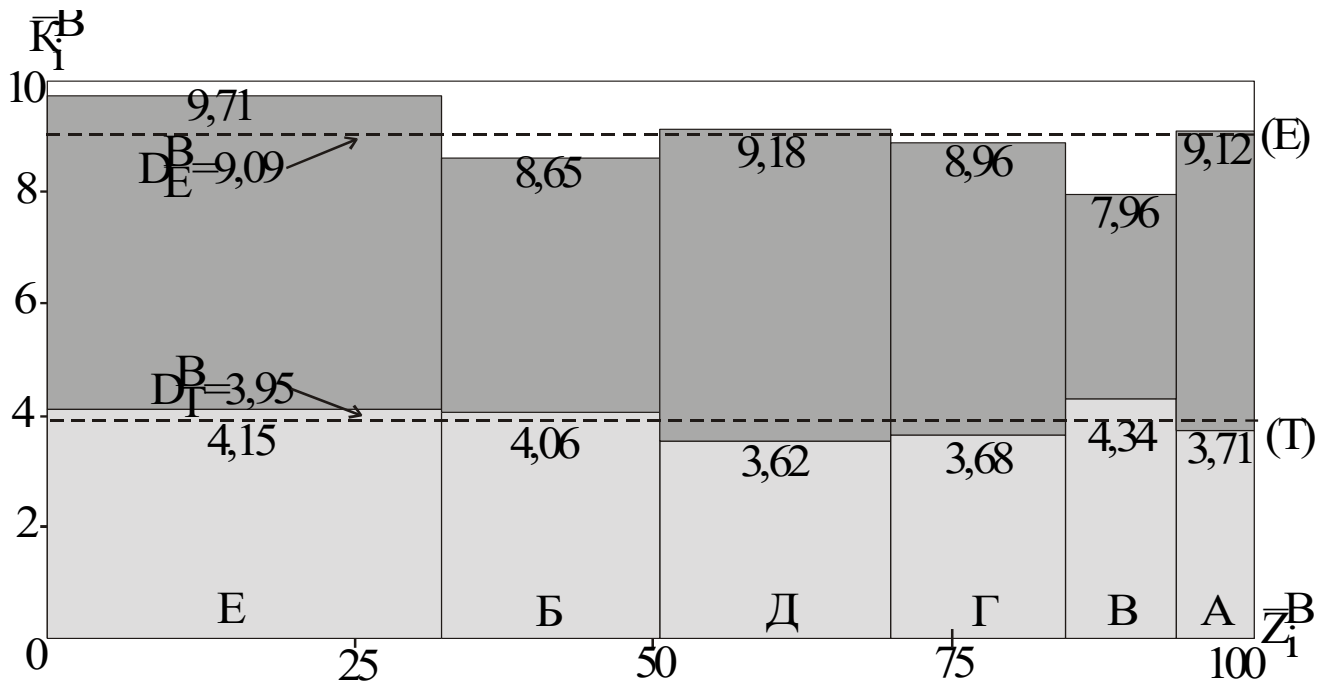


Рис. 3.2. Діаграма “дидактичної якості” методики вивчення електродинаміки традиційної (Т) і експериментальної (Е) (група експертів В).

Для цього обчислимо спочатку “вагу” W_i кожного із критеріїв оцінювання згідно співвідношення: $W_i = W_0 + \frac{Q_i - Q_0}{Q_s - Q_0} (W_s - 1)$, де Q_0 і Q_s – рангові суми найменш і найбільш значущого критеріїв (мінімальна і максимальна відповідно); Q_i – рангова сума критерію i , вага якого

визначається; W_o і W_s – вага найменш і найбільш значущого критеріїв відповідно (приймаємо $W_o=1$, $W_s=6$).

Використовуючи дані таблиць А.2 і А.3 “Додатку А”, обчислимо W_i^A і W_i^B . Використовуючи дані таблиць А.6 і А.7 “Додатку А”, проводимо рангування оцінок $K_{ij(T)}$ і $K_{ij(e)}$: більш високій оцінці присвоюємо ранг $X_{ij}=1$, а більш низькій $X_{ij}=2$. Якщо ж має місце $K_{ij(T)}=K_{ij(e)}$, то обом оцінкам присвоюємо ранг 1,5. Ранги оцінок відповідності критеріям традиційної і експериментальної методики в таблицях А.12 і А.13 “Додатку А”.

Результуючий зважений ранг двох альтернативних методик викладання шкільного курсу електродинаміки визначаємо згідно співвідношень:

$$X_T = \sum_{i=1}^m W_i \sum_{j=1}^{n^A} X_{ij(T)} = \sum_{i=1}^m W_i X_{i(T)}; \quad X_e = \sum_{i=1}^m W_i \sum_{j=1}^{n^B} X_{ij(e)} = \sum_{i=1}^m W_i X_{i(e)},$$

де $1 \leq i \leq m=6$, $1 \leq j^A \leq n^A=11$, $1 \leq j^B \leq n^B=32$

Необхідні для обчислення X_T і X_E значення Q , W_i і $X_{i(T)}$, $X_{i(e)}$ зведені в таблиці А.14 і А.15 “Додатку А”.

В результаті обчислення отримуємо:

$$\begin{aligned} X_T^A &= 440 & X_T^B &= 1213 \\ X_E^A &= 230 & X_E^B &= 636. \end{aligned}$$

Відношення результуючих рангів традиційної і експериментальної методики вивчення шкільного курсу електродинаміки, які розглядаються як альтернативні, дорівнює: $\frac{X_E^A}{X_T^A} = 1,91$, $\frac{X_E^B}{X_T^B} = 1,90$.

В відповідності з [140] така різниця зважених рангів свідчить про те, що на думку експертів обох груп експериментальна методика в плані комплексної реалізації функцій навчання за своїми властивостями більш близька до оптимальної і має більш високі дидактичні можливості. В зв'язку з тим, що експертне оцінювання розробленої методики формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки проводилося у відповідності з вимогами об'єктивної експертизи, такий висновок слід вважати об'єктивним і розроблена методика, яка забезпечує розвиток науково-

теоретичного мислення учнів, може бути рекомендована для впровадження в педагогічну практику, причому очікуваний дидактичний ефект від її застосування вищий реального ефекту, який отримується на основі застосування традиційної методики.

Разом з тим, метод експертного оцінювання має деякі недоліки, які не дозволяють визнати його результати в якості кінцевих висновків: спроби отримати об'єктивні висновки на основі суб'єктивних думок експертів можуть породжувати помилки “центральної тенденції”, “тенденціозності”, “близькості” і ін. [140, с. 97], тому ми вважали за доцільне експертне оцінювання доповнити формуючим експериментом (експериментальним навчанням), в якому використовувалась розроблена методика формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки.

3.2. Діагностично – прогностична оцінка результатів ефективності експериментальної і традиційної методик викладання шкільного курсу електродинаміки у профільних класах. Аналіз результатів перевірконо – оціночної діяльності учнів.

Крім того, формуючий експеримент переслідував мету порівняти реальну дидактичну ефективність експериментальної і традиційної методик викладання розділу «Електродинаміка» у профільних класах, тобто порівняти рівні засвоєння фундаментальних фізичних понять в учнів і сформованість у них умінь використовувати набуті знання до аналізу конкретних фізичних ситуацій.

Експериментальне навчання проводилось у 1995–2009 рр. в середніх школах м. Тернополя (№ 1, 8, 11, 27, Тернопільському педагогічному ліцеї) і Тернопільській області. В експерименті приймали участь 12 вчителів, він охопив більше 800 учнів (при безпосередній участі автора – 764 учні 10-11 класів), що дозволило сформувати контрольну і експериментальну вибірки, що складаються із 571 учня і задовольняють умови репрезентативної вибірки [38; 39; 65; 100]. Вчителі, які приймали участь у експерименті, пройшли попередню

підготовку, а також отримали відповідні методичні матеріали.

Під час вивчення електродинаміки проводилися підсумкові контрольні роботи. Задачі складались із врахуванням можливості 3-го рівня засвоєння знань – уміння застосовувати знання в нових умовах (додаток А.20), але у контрольних роботах були задачі на відтворення знань (1-й рівень) і на володіння знаннями в знайомій ситуації (2-й рівень). Початковий рівень знань учнів ЕГ та КГ був однаковий ($\alpha = 5\%$).

Результати виконання контрольних робіт в ЕГ і КГ подано у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

	Категорія 1 (погано)	Категорія 2 (задовільно)	Категорія 3 (добре)	Категорія 4 (відмінно)	
Частота ознаки в ЕГ	16	97	101	73	$n_1=287$
Частота ознаки в КГ	21	124	89	50	$n_2=284$

Тут O_{li} означає кількість учнів ЕГ, які отримали оцінку i ($i=1, 2, 3, 4$). Оскільки вибірки учнів випадкові і незалежні, а вимірювана властивість (рівень засвоєння знань) має неперервний розподіл і виміряна за шкалою порядку, що має чотири категорії, то для перевірки нульової гіпотези скористаємося критерієм χ^2 .

Нульова гіпотеза, яку ми перевіряємо, вказує на рівність ймовірностей попадання об'єктів ЕГ і КГ в кожен із чотирьох категорій, тобто $p_{11} = p_{21}$, $p_{12} = p_{22}$, $p_{13} = p_{23}$ і $p_{14} = p_{24}$. Отже, нульова гіпотеза має вигляд $H_0: p_{li} = p_{2i}$ для всіх чотирьох категорій, а альтернативна гіпотеза має вигляд $H_1: p_{li} \neq p_{2i}$ хоча б для однієї із чотирьох категорій.

Для перевірки розглянутої вище гіпотези з допомогою критерію χ^2 на основі даних таблиці 3.3 підраховуємо значення критерію T за формулою [226]:

$$T = \frac{1}{n_1 n_2} \sum_{i=1}^4 \frac{(n_1 O_{2i} - n_2 O_{1i})^2}{O_{1i} + O_{2i}},$$

де n_1 і n_2 – об'єм вибірок, O_{li} ($i=1, 2, 3, 4$) – число

об'єктів ЕГ, які попали в i -у категорію за рівнем засвоєння знань, а O_{2i} – число об'єктів КГ, які попали в i -у категорію (абсолютна частота появи ознаки в КГ).

$$T = \frac{1}{287284} \left[\frac{(28721-28416)^2}{16+21} + \frac{(287124-28497)^2}{12497} + \frac{(28789-28410)^2}{89+101} + \frac{(28750-28473)^2}{50+73} \right] = 9,01$$

За таблицею критичних значень статистики, які мають розподіл χ^2 для кількості степенів вільності $\nu=3$ і рівня значущості $\alpha=0,05$ [65, с 130] знаходимо: $T_{кр}=7,815$. Оскільки $T_{експ}>T_{кр}$ ($9,1>7,815$), згідно з правилом прийняття рішення, нульову гіпотезу відхиляємо на рівні значущості $\alpha=0,05$ і приймаємо альтернативну гіпотезу. Тобто отримані результати виконання контрольних робіт дають достатні основи для підтвердження ефективності розробленої нами методики формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки.

Наприкінці вивчення розділу «Електродинаміка», у 11-у класі проводили підсумкову контрольну роботу. В експерименті приймало участь 616 чоловік, 304 учні навчались в ЕГ, 312 учнів в КГ. В результаті одного з показників ефективності перевірки розробленої методики використовувались результати контрольної роботи із 9 завдань (таблиці А.23 – А.25, додаток А.20 “Додатку А”). В проведеному експерименті виконуються всі умови, необхідні для використання критерію Колмогорова-Смірнова.

Із учнів, які писали контрольну роботу і навчалися в експериментальній групі (ЕГ) відібрано методом випадкового відбору 250 чоловік; із учнів КГ теж відібрали 250 чоловік. Перевірялась гіпотеза $H_0: F(x)=G(x)$, або положення про однакові функції розподілу кількості вірних відповідей на контрольні завдання серед учнів, які навчалися за різними варіантами методики. Альтернативна гіпотеза $H_1: F_1(x)\neq G(x)$ припускає, що функція розподілу кількості правильних відповідей різна в двох досліджуваних випадках. Результати виконання роботи двох вибірок записано в таблиці, зручної для знаходження статистики критеріїв.

За формулою $T_1 = \frac{1}{n} \cdot \max |\sum f_1 - \sum f_2|$, (2), де $\sum f_1$ – сума накопичених

частот в ЕГ, а $\sum f_2$ – сума накопичених частот в КГ, $n=n_1=n_2$ [65, ст. 112] знайдемо значення статистики двостороннього критерію для вибірок однакового об'єму $n = n_1 = n_2 = 250$.

Із таблиці експериментальних даних (табл. 3.4) знаходимо, що найбільше значення виразу $(|\sum f_1 - \sum f_2|)$ дорівнює 39.

Таблиця 3.4

Кількість правильн. відповідей	Абсолютна частота в ЕГ, f_1	Абсолютна частота в КГ, f_2	Накопичена частота в ЕГ, $\sum f_1$	Накопичена частота в КГ, $\sum f_2$	$ \sum f_1 - \sum f_2 $
1	2	3	4	5	6
9	54	43	250	250	0
8	82	60	196	207	11
7	41	35	114	147	33
6	27	35	73	112	39
5	18	31	46	77	31
4	12	20	28	46	18
3	7	10	16	26	10
2	5	7	9	16	7
1	3	5	4	9	5
0	1	4	1	4	3

Отже, згідно з формулою (2) $T_1 = \frac{1}{n} \cdot \max |\sum f_1 - \sum f_2| = \frac{1}{250} \cdot 39 = 0,156$

Критичне значення статистики критерію знаходимо за формулою

$$W_{1-\alpha} \approx \lambda_{\alpha} \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}}, \quad (3)$$

складеною для вибірок $n > 40$. Для $\alpha = 0,05$ і відповідно $\lambda_{\alpha} = 1,36$ [65, ст.115], згідно формули (3) $W_{1-\alpha} = 1,36 \sqrt{\frac{250+250}{250 \cdot 250}} = 0,122$

Отже, $T_{1\text{нобм}} > W_{1-\alpha}$ ($0,156 > 0,122$). Тому у відповідності з правилом прийняття рішення [65, с. 113, випадок а)] нульова гіпотеза відхиляється і приймається альтернативна гіпотеза H_1 [65, с. 116], що дозволяє зробити висновок про різницю розподілу кількості правильних відповідей на контрольні завдання у експериментальній групі та контрольній групі. Аналіз експериментальних даних (див. два перших стовпці табл. 3.4) для підстави

стверджувати, що учні ЕГ, які навчалися за розробленою нами методикою формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки, глибше і повніше засвоїли цю фізичну теорію.

При формуванні змісту завдань ми виходили з того, що контрольні роботи повинні задовольняти вимогам змістовної і функціональної валідності, надійності і доступності [65]. В останньому ми могли переконатися, піддавши їх експертному оцінюванню, в якому прийняли участь вчителі, які працювали в звичайних умовах експерименту (вибірка 12 чоловік), а також виконавши контрольну роботу в умовах попереднього експерименту.

Результати контрольних робіт опрацьовувались шляхом використання двостороннього критерію χ^2 . Можливість такого підходу в розглядуваному випадку базується на співпаданні умов експерименту з необхідними умовами застосування критерію χ^2 : обидві вибірки, контрольна і експериментальна випадкові і незалежні одна від одної. Крім того, учні – члени кожної із вибірок, в процесі виконання контрольних робіт також не залежали один від одного. Шкала вимірювань є шкалою найменувань із двома категоріями: учень попадає в категорію “1”, якщо завдання в цілому виконано вірно, або категорію “2”, якщо завдання в цілому виконано невірно.

В таблицях А.16 – А.19 “Додатку А” вказано абсолютні частоти належності учнів контрольної і експериментальної вибірок до категорії “1” в зв’язку з виконанням ними контрольних робіт по курсу електродинаміки. Для спрощення обробки результатів експерименту в контрольну і експериментальну вибірки при виконанні контрольних робіт включалося по 100 учнів, так що подані в таблицях А.16 – А.19 “Додатку А” абсолютні частоти одночасно є і відносними, вираженими в процентах.

В зв’язку із зробленими вище зауваженнями про компонування контрольної і експериментальної вибірок, можлива побудова таблиць 3.5 і 3.6, в першій із яких зафіксовано абсолютні, а в другій – відносні частоти правильного виконання окремих завдань контрольних робіт учнями, тобто частоти їх залежності до категорії “1” шкали вимірювань. При цьому прийнято

до уваги, що для абсолютних частот L_i : $L_{i(k)} = \sum_{j=1}^4 L_{ij(k)}$; $L_{i(e)} = \sum_{j=1}^4 L_{ij(e)}$,

де i – порядковий номер завдання контрольної роботи; j – умовний порядковий номер контрольної роботи, а для відносних частот l_i в процентах:

$$l_{i(k)} = \frac{\sum_{j=1}^4 L_{ij(k)}}{\sum_{j=1}^4 N_{j(k)}} \cdot 100\% = \frac{L_{i(k)}}{N_k} \cdot 100\% = \frac{L_{i(k)}}{400} \cdot 100\% = \frac{1}{4} L_{i(k)} (\%)$$

$$l_{i(e)} = \frac{\sum_{j=1}^4 L_{ij(e)}}{\sum_{j=1}^4 N_{j(e)}} \cdot 100\% = \frac{L_{i(e)}}{N_e} \cdot 100\% = \frac{L_{i(e)}}{400} \cdot 100\% = \frac{1}{4} L_{i(e)} (\%)$$

де $N_k = N_e = 400$ – загальна кількість членів контрольної (1) і експериментальної (2) вибірок відповідно;

$N_{j(k)} = N_{j(e)} = 100$ – кількість членів контрольної і експериментальної вибірок, які виконували j -у контрольну роботу.

Як видно із таблиці 3.6, учні експериментальної вибірки відтворюють вірно рівняння загальних законів на 9,2% частіше, ніж учні контрольної вибірок. Крім того, вони вірно розв'язують на 10,8% частіше прості і на 14,3% частіше складні задачі.

Останнє свідчить, що засвоєння учнями експериментальної вибірки матеріалу курсу електродинаміки на основі ФФП більш стійке і більш глибоке, ніж його засвоєння учнями контрольної вибірки.

Таблиця 3.5

Абсолютні частоти вірного виконання завдань контрольних робіт учнями контрольної (К) і експериментальної (Е) вибірок.

№ завдання (і)	1	2	3
Абсолютні частоти			
$L_{i(K)}$	259	170	88
$L_{i(E)}$	296	213	145
$L_{i(E)} - L_{i(K)}$	37	43	57

Таблиця 3.6

Відносні частоти вірного виконання завдань контрольних робіт учнями контрольної (К) і експериментальної (Е) вибірок.

№ завдання (і)	1	2	3
Відносні частоти			
$l_{i(K)} (\%)$	64,8	42,5	22
$l_{i(E)} (\%)$	74,1	53,3	36,3
$l_{i(E)} - l_{i(K)} (\%)$	9,2	10,8	14,3

Перевіримо достовірність цих висновків статистичними методами, тобто доведемо, що підкреслені властивості вибірок статистично різні, або, що те ж саме, що розподіл учнів контрольної і експериментальної вибірок за категоріями шкали вимірювань різні. Для цього використаємо методику, викладену у [65, с. 96–106].

В якості нульової гіпотези приймемо наступну: контрольна і експериментальна вибірки статистично не відрізняються одна від одної, тобто виявлені в них відмінності мають випадковий характер. Тобто, ймовірності P_K і P_E того, що випадково взяті із контрольної (К) і експериментальної (Е) вибірок учні належать до категорії оцінок 1, повинні співпадати: $H_0: P_K = P_E$.

В якості альтернативної гіпотези приймемо наступну: контрольна і експериментальна вибірки статистично різні, тобто виявлені в них відмінності носять не випадковий характер. Отже, ймовірність P_K і P_E належності до категорії оцінок (1) учнів контрольної і експериментальної груп відповідно не рівні між собою: $H_1: P_K \neq P_E$.

Перевірку гіпотез H_0 і H_1 проведемо з достовірністю (надійністю) $\theta=0,95$ (значущість $\alpha=1-\theta=0,05$) за всіма видами завдань окремо, внаслідок того, що статистична різниця вибірок в цілому може мати місце і при відсутності статистичної різниці за однією із окремих властивостей. З цією метою складаємо квадратні таблиці рангу 2×2 , елементи яких N_{nm} є абсолютними частотами належності членів вибірки n до категорії m шкали вимірювань

(загальний вигляд – таблиця 3.7; окремо для різних завдань ($i=1, 2, 3$) – таблиці А.20, А.21 і А.22 “Додатку А”).

Таблиця 3.7.

Таблиця для розрахунку значень статистики критерію χ^2 (Т).

Категорія шкали (m)			
Вибірка (n)	Вірно (1)	Невірно (2)	$\sum_{m=1}^2 N_{nm}$
Контрольна (1)	N_{11}	N_{12}	$N_{11}+N_{12}=N_1$
Експериментальна (2)	N_{21}	N_{22}	$N_{21}+N_{22}=N_2$
$\sum_{n=1}^2 N_{nm}$	$N_{11}+N_{21}$	$N_{12}+N_{22}$	$\sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^2 N_{nm} = N$

Як відмічено вище, обидві вибірки і шкала вимірювань задовільняють необхідні умови застосування критерію χ^2 . Крім того, так як $N=800>20$, а кожна абсолютна частота $N_{nm} \geq 85 > 5$, то виконуються і достатні умови. Беручи до уваги, що кожен $N_{nm} \geq 85 > 5$, використовуємо для обчислення спостережуваних значень статистики критерій χ^2 [65, с. 98]:

$$T = \frac{M(N_{11}N_{22} - N_{12}N_{21})^2}{N_1N_2(N_{11}+N_{21})(N_{12}+N_{22})}$$

Обчислення спостережуваних значень статистики критерію Т подано в “Додатку А”, а результати обчислень зведено у таблицю 3.8.

Таблиця 3.8.

Результати розрахунку значень статистики критерію χ^2 (Т) для окремих завдань контрольних робіт.

№ завдання (i)	1	2	3
Статистика критерію (Т)	8,05	9,26	9,7

Приймаючи до уваги, що $\nu = 1$, $\alpha = 0,05$, маємо: $T_{крит.} = 3,84$. ($\nu = 3$, $\alpha = 0,05$, маємо: $T_{крит.} = 7,82$) Як впливає із таблиці 3.8, в виконаному нами експерименті для завдань всіх трьох видів спостерігається $T_i > T_{кр.}$. Згідно правила прийняття рішень для критерію χ^2 , останнє служить достатньою основою для відхилення нульової гіпотези H_0 і прийняття гіпотези з надійністю 0,95 (значущість 0,05): розподіл членів контрольної і експериментальної вибірок за критеріями оцінок

статистично різні.

Оскільки вибірки відрізнялись тільки однією ознакою – методикою формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка», слід визнати, що виявлена в експерименті відмінність є її наслідком. Експериментальна методика, яка базується на викладанні розділу «Електродинаміка» на основі фундаментальних фізичних понять сприяє більш глибокому і міцному засвоєнню навчального матеріалу.

На основі даних успішності експериментального навчання учнів 10-11 профільних класів під час вивчення розділу «Електродинаміка» нами перевірено, використовуючи критерій Стьюдента, гіпотезу про наявність лінійного кореляційного зв'язку між динамікою показників успішності та використовуваними методиками експериментального навчання розділу «Електродинаміка»: експериментальною - на основі фундаментальних фізичних понять, та традиційною. Побудовано лінії регресії динаміки успішності навчання розділу «Електродинаміка» для експериментальних та контрольних класів (додатки А. 18, А. 19). Аналіз (додатки А. 18, А. 19) підтверджує, що педагогічна ефективність вивчення розділу «Електродинаміка» на основі фундаментальних фізичних понять вища, ніж традиційна: для експериментальних класів отримано для динаміки успішності навчання розділу «Електродинаміка» рівняння зростаючої лінії регресії $y=5,01+0,13x$, для контрольних класів – $y=6,95+0,01x$ – постійну функцію лінії регресії. Середній бал успішності в експериментальних класах зріс порівняно з середнім балом успішності в контрольних класах на 0,9 балів.

Отже, експеримент повністю підтвердив гіпотезу дослідження і довів дидактичну ефективність та доступність розробленої методики формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки. Використання розробленої методики забезпечує високий рівень засвоєння учнями знань узагальненого характеру і формування в них узагальнених вмінь застосовувати ці знання до аналізу фізичних явищ.

Висновки до третього розділу

Аналіз результатів формуючого експерименту засвідчив наступне:

1. Завдяки впровадженню запропонованої методики вдалось суттєво підвищити якість знань у експериментальних класах. Учні експериментальної вибірки відтворюють правильно рівняння загальних законів на 9,2% частіше, ніж учні контрольної вибірок. Крім того, вони правильно розв'язують на 10,8% частіше прості і на 14,3% частіше складні задачі. Для експериментальних класів отримано значення критерію Пірсона χ^2 , яке лежить у межах від 8,05 до 9,7, критичне його значення $T_{крит.} = 7,82$. Оскільки $T_{експ} > T_{кр}$, то статистично підтверджено, що вищий рівень знань у процесі вивчення розділу «Електродинаміка» в експериментальних класах є результатом застосування запропонованої методики формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів. Середній бал успішності в експериментальних класах зріс порівняно з середнім балом успішності в контрольних класах на 0,9 балів.

2. Аналіз навчального матеріалу показує, що учні експериментальних класів не тільки мали кращі показники навчання, але й засвоїли навчальний матеріал на глибшому науковому рівні, ніж учні контрольних класів, із таких тем: 1) Потік напруженості електричного поля. Теорема Остроградського-Гаусса. Густина енергії електричного поля. 2) Електричний струм у різних середовищах. Електропровідність напівпровідників та її види. 3) Електрична і магнітна взаємодії. 4) Індукція магнітного поля. Потік магнітної індукції. Сила Ампера. Сила Лоренца. Закон Біо-Савара-Лапласа. 5) Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції. Самоіндукція. ЕРС самоіндукції. Індукційне електричне поле. Вихрові струми. Енергія магнітного поля котушки зі струмом. 6) Рівняння електромагнітних гармонічних коливань. Перетворення енергії в коливальному контурі. Затухаючі електромагнітні коливання. 7) Утворення і поширення електромагнітних хвиль. Гіпотеза Максвелла. Рівняння Максвелла. Електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія. 8) Світло як електромагнітна

хвиля. Когерентність світлових хвиль. Інтерференція світла. Дифракція світла. Зони Френеля. Принцип Гюйгенса-Френеля. 9) Квантові властивості світла. Гіпотеза М. Планка. Світлові кванти. Маса, енергія та імпульс фотона. Ефект А. Комптона. Фотоефект. 10) Корпускулярно-хвильовий дуалізм світла. Гіпотеза де Бройля. Хвильові властивості частинок. Поняття про квантову механіку. 11) СТВ стосовно електродинамічних явищ.

3. Учні експериментальних класів мали вищу якість знань (77,78 % у експериментальних класах і 59,92 % у контрольних класах), хоч розроблена методика має вищий рівень теоретичного обґрунтування та узагальнення основних положень. Тобто, отримані результати успішності учнів протягом вивчення розділу «Електродинаміка» та результати виконання контрольних робіт дають достатні основи для підтвердження ефективності розробленої нами методики формування системи фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки.

4. Аналіз успішності експериментального навчання показує, що розроблена методика на основі системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, ймовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, електромагнітна хвиля, фотон та ін.) доступна учням профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів.

5. Результати педагогічного експерименту свідчать про **підтвердження гіпотези дисертаційного дослідження** стосовно дидактичної ефективності, результативності та доступності запропонованої методики формування системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, ймовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, електромагнітна хвиля, фотон та ін.) в учнів профільних (фізичних, фізико-математичних і фізико-технічних) класів у процесі вивчення електродинаміки, та про **досягнення мети дослідження**.

ВИСНОВКИ

Результати проведеного теоретичного і експериментального дослідження проблеми формування фундаментальних фізичних понять в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки дають підстави зробити такі висновки:

1. За аналізом літературних джерел встановлено, що впровадження профільного навчання фізики (фізичний, фізико-математичний, фізико-технічний профілі) передбачає систематизоване вивчення учнями основних фізичних теорій і формування в них світогляду і наукового стилю мислення на основі фізичної картини світу. У зв'язку з цим виникає необхідність здійснення такого підходу до організації навчання фізики учнів профільних класів, у процесі якого буде забезпечено оволодіння учнями універсальними засобами пізнання та основними структурними елементами змісту навчального матеріалу. Розв'язання цього завдання вимагає відповідного змістовного наповнення навчального матеріалу з фізики, що забезпечить максимальну кількість зв'язків між його елементами.

2. Показано, що фундаментальні фізичні поняття, як визначальні компоненти фізичних теорій, мають бути покладені в основу вивчення курсу фізики профільних класів і стати основними структурними елементами змісту навчання. Дослідження та цілеспрямована організація процесу формування фундаментальних фізичних понять забезпечать необхідні умови для підвищення якості навчання фізики учнів профільних класів та розвитку в них науково-теоретичного способу мислення.

3. Обґрунтовано, що на основі системи фундаментальних фізичних понять ефективно здійснюються генералізація та систематизація розділу «Електродинаміка» в профільних класах. Показано, що об'єднуючою основою при вивченні тем розділу «Електродинаміка» слугують поняття електромагнітного поля та електромагнітної взаємодії. Систематизовано розділ «Електродинаміка» для профільних класів на основі системи фундаментальних

фізичних понять.

4. Вперше розроблено методику формування в учнів профільних класів системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, електромагнітна хвиля, фотон та ін.) у процесі вивчення розділу «Електродинаміка». Вона передбачає:

а) упровадження принципів і методів формування фундаментальних фізичних понять, що обумовлює змістовний, якісний і функціональний відбір навчального матеріалу, структурно-логічні схеми вивчення окремих розділів, засвоєння моделей процесу формування понять у навчальній діяльності учнів;

б) організацію навчально-виховного процесу з фізики у профільних класах з використанням розвиваючих освітніх технологій та на основі фундаментальних фізичних принципів та ідей сучасної фізичної науки, адаптованих для сприйняття учнями профільних класів, що дозволяє активізувати початково-пізнавальну діяльність учнів;

в) узагальнення навчального матеріалу розділу «Електродинаміка» для учнів профільних класів на основі фундаментальних фізичних принципів, понять та ідей сучасної фізичної науки;

г) формування фундаментальних фізичних понять на основі конструктивного та системного підходів, як основних дидактичних одиниць навчального матеріалу, які забезпечують максимальну кількість зв'язків між змістовними елементами.

5. Розроблено методику вивчення розділу «Електродинаміка» у профільних класах на основі системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, електромагнітна хвиля, фотон та ін.).

6. Розроблено інформаційно-методичне забезпечення для формування в учнів профільних класів системи фундаментальних фізичних понять (симетрія, невизначеність, відносність, імовірність, заряд, електромагнітне поле, електромагнітна взаємодія, електромагнітна хвиля, фотон та ін.) у процесі

вивчення розділу «Електродинаміка».

7. Експериментально досліджено методику формування в учнів профільних класів системи фундаментальних фізичних понять, методику вивчення розділу «Електродинаміка» на основі системи фундаментальних фізичних понять та підтверджено їх методичну ефективність.

Таким чином, запропонована нами методика викладання фізики у профільних класах є ефективною не лише в аспекті розвитку наукового мислення учнів, але і в аспекті підвищення наукового рівня розділу «Електродинаміка» на основі засвоєння учнями знань узагальненого характеру та узагальнених вмінь.

До напрямків подальшого дослідження відносимо формування фундаментальних фізичних понять в учнів у процесі вивчення фізики на рівні стандарту та академічному рівні, удосконалення змісту і структури курсу фізики для профільних класів на основі фундаментальних фізичних понять, організацію навчальної діяльності учнів на основі фундаментальних фізичних понять у курсі фізики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрєєв А.М. Розвиток уміння формулювати і розв'язувати експериментальні задачі з фізики у процесі винахідницької діяльності старшокласників: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / А.М. Андрєєв. — К., 2007. — 20 с.
2. Астахов А.В. Курс фізики. Т.2. Електромагнітне поле. / А.В. Астахов, Ю.М. Широков. — М.: Наука, 1980. — 360 с.
3. Ахиезер А.И. Поля и фундаментальные взаимодействия. / А.И. Ахиезер, С.В. Плетинский. — К: Наукова думка, 1986. — 552с.
4. Ахундов М.Д. Физика на пути к единству. / М.Д. Ахундов, Л.Б. Баженов. — М.: Наука, 1985. — 164 с.
5. Ахундов М.Д. Методология научных революций и развитие физики / М.Д. Ахундов, С.В. Илларионов // Природа научного открытия: философско-методологический анализ. — М.: 1986. — С. 279–296.
6. Бетев В.А. Теоретические основы методики обучения физике. Пропедевтический курс: автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / В.А. Бетев — М., 1996. — 48с.
7. Бешелев С.Д. Математико – статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. — М.: Статистика, 1980. — 263 с.
8. Бор Н. Жизнь и творчество. Сборник статей / Н. Бор. — М.: Наука, 1967. — 344 с.
9. Бор Н. Избранные научные труды, в 2-х томах. — Т.2. Статьи 1925–1961. / Н. Бор. — М.: Наука, 1971. — 675 с.
10. Бранский В.П. Теория элементарных частиц как объект методологического исследования. / В.П. Бранский. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. — 257 с.

11. Бредов М.М. Классическая электродинамика: Учебное пособие. / М.М. Бредов, В.В. Румянцев, И.Н. Топтыгин; под ред. И.Н. Топтыгина. – М.: Наука. Главная редакция физико – математической литературы, 1985. – 400 с.
12. Бройль Луи де. Волны и кванты /Луи де Бройль // УФН. – 1967. – Т.93. – №17 – С. 178 – 180.
13. Бубликов С.В. Использование принципа относительности при обучении физики в средней школе: дисс. ... канд. пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / С.В Бубликов. – С. – Петербург, 1991. – 157 с.
14. Бугаев А.И. Методика преподавания физики в средней школе: Теоретические основы / А.И. Бугаев. – М.: Просвещение, 1981. – 288 с.
15. Бугаев А.И. Тенденции развития обучения физике в современной общеобразовательной школе: автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / А.И. Бугаев. – М., 1983. – 48 с.
16. Бугайов О.І. Вивчення атомної і ядерної фізики в школі: Посібник для вчителів. / О.І. Бугайов. – К.: Радянська школа, 1981. – 158 с.
17. Будний Б.Є. Вивчення квантової фізики в школі: Посібник для вчителів і учнів. / Б.Є. Будний. – К.: Ін – т педаг. АПН України, 1994. – 160 с.
18. Будний Б.Є. Методичний підхід до вивчення квантових закономірностей / Б.Є Будний // Педагогіка і психологія. – 1995. – № 3. – С.40 – 51.
19. Будний Б.Є. Перші кроки до вивчення сучасних фізичних теорій / Б.Є Будний // Мандрівець. – Тернопіль, 1994. – № 2. – С.4 – 28.
20. Будний Б.Є. Пропедевтика квантових уявлень учнів при вивченні фізики в 6 – 8 класах / Б.Є. Будний – К.: Інститут педагогіки, 1984. – 140 с.
21. Будний Б.Є. Розвиток квантових уявлень учнів при вивченні фізики в школі : дис. ... канд. пед. наук: спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Б.Є. Будний. – К., 1986. – 167 с.

22. Будний Б.Є. Розв'язування задач як засіб розвитку уявлень учнів про досліджувані явища / Б.Є. Будний // Розв'язування задач з фізики. Навчально – методичний посібник. – К., 1989. – С. 36 – 49.
23. Будний Б.Є. Теоретичні основи формування в учнів системи фундаментальних фізичних понять: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора пед. наук: спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Б.Є. Будний. – К., 1997. – 51 с.
24. Будний Б.Є. Формування в учнів системи фундаментальних фізичних понять / Б.Є. Будний. – К.: Інститут пед. АПН України, 1996. – 200 с.
25. Будний Б.Є. Інтеграція природничих дисциплін на основі фундаментальних фізичних принципів / Б.Є. Будний, В.І. Тищук // Українознавство та проблеми інтеграції природничих знань в умовах сучасної школи. – Тернопіль, 1993. – С.51 – 53.
26. Буйницька О.П. Розвиток інтересу до навчання фізики в учнів основної школи у позакласній роботі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / О.П. Буйницька. — К., 2008. — 20 с.
27. Бурак В.І. Методика навчання електромагнетизму в основній школі в умовах диференціації навчання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / В.І. Бурак. — К., 2009. — 20 с.
28. Буховцев Б.Б. Фізика. 10 кл. / Б.Б. Буховцев, Ю.Л. Климантович, Т.Я. Мякишев. – К.: Освіта, 1993. – 256 с.
29. Вагіс А.І. Методичні засади застосування дидактичних засобів у навчанні фізики в класах природничого профілю: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / А.І. Вагіс. — К., 2007. — 20 с.
30. Вейль Г. Симметрия / Г.Вейль – М.: Наука, 1968. – 120 с.
31. Вернадский В.И. Научная мысль как планетарное явление / В.И. Вернадский. – М.: Наука, 1991. – 270 с.

32. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружение / В.И. Вернадский. – М., 1987. – 360 с.
33. Вертгеймер М. Продуктивное мышление / М. Вертгеймер – М.: Прогресс, 1987. – 336 с.
34. Вигнер К. Этюды о симметрии / К. Вигнер – М.: Мир, 1971. – 320 с.
35. Визгин В. П. Развитие взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения в классической физике / В. П. Визгин. – М.: Наука, 1972. – 240 с.
36. Визгин В.П. Единая теория поля в первой трети XX века / В.П. Визгин. – М.: Наука, 1985. – 303 с.
37. Визгин В.П. Роль идей Маха в генезисе общей теории относительности / В.П. Визгин // Эйнштейновский сборник 1986 – 1990. – М.: Наука, 1990. – С. 49–57.
38. Воловик П.М. Педагогічна технологія застосування регресійного і кореляційного аналізів в педагогічних дослідженнях / П.М. Воловик // Неперерв. проф. освіта: теорія і практика. — 2007. — № 1-2. — С. 13 – 24.
39. Воловик П.М. Педагогічна технологія застосування регресійного і кореляційного аналізів у педагогічних дослідженнях / П.М. Воловик // Неперерв. проф. освіта: теорія і практика. — 2008. — № 1. — С. 42 – 50.
40. Волковыский Р.Ю. Физические понятия и закономерности в системе теоретического знания и методические принципы их формирования : автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / Р.Ю. Волковыский. – Л., 1989. – 33 с.
41. Волькенштейн М. Квантование и стоячие волны / М. Волькенштейн // Квант. – 1986. – № 3. – С. 26 – 33.
42. Вольштейн С.Л. Методы физической науки в школе: [пос. для учителей] / С.Л. Вольштейн. – Минск: Нар. осв., 1988. – 144 с.
43. Выготский Л. С. Собрание сочинений в 6 – ти томах / Л. С. Выготский. – М.: Наука, – 1982. – Т.2. – 504 с.

44. Выготский Л.С. Собрание сочинений в 6-ти томах. / Л.С. Выготский – М.: Наука, – 1981. – Т.1. – 280 с.
45. Гайдук С.М. Науково-методичні засади створення та використання навчального комплексу з оптики: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / С.М. Гайдук. — Кривий Ріг, 2002. — 19 с.
46. Гайденко П.П. Эволюция понятия науки (XVII–XVIII вв.). Формирование научных программ Нового времени / П.П. Гайденко. – М.: 1987. – 447 с.
47. Гальперин П.Я. Основные результаты исследования по проблеме "Формирование умственных действий и понятий". / П.Я. Гальперин. – М.: Изд – во МГУ, 1965. – 257 с.
48. Гейзенберг В. О квантовом теоретическом истолковании кинематических и механических соотношений / В. Гейзенберг // УФН. – 1977. – Т.122, № 4. – С. 574 – 586.
49. Гейзенберг В. Развитие понятий в физике XX столетия / В. Гейзенберг // Вопр. философии. – 1975. – № 1. – С.79 – 88.
50. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое: / В. Гейзенберг. – М.: Наука, 1990. – 400 с.
51. Герц Г. Соотношение между экспериментом, моделью и теорией в процессе естественнонаучного познания / Г. Герц // Эксперимент. Модель. Теория. – М.: Берлин, 1982. – С. 5 – 22.
52. Гладышева Н.К. Теоретические основы преподавания физики в основной школе : автореф. дисс. д – ра пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / Н.К. Гладышева. – М., 1997. – 40 с.
53. Голин Г.М. Вопросы методологии физики в курсе физики средней школы: кн. [для учителя] / Г.М. Голин. – М.: Просвещение, 1987. – 127 с.
54. Голин Г.М. Образовательные и воспитательные функции и методологии научного познания в школьном курсе физики: дис.... докт. пед.

наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / Г.М.Голин. – Коломна, 1986. – 333 с.

55. Гончаренко С. У. Фізика : [проб. навч. посібник для 11–х кл. ліцеїв і гімназій природничо – наукового профілю] / С. У. Гончаренко. – К.: Освіта, 1995. – 448 с.

56. Гончаренко С. Стандарт шкільної фізичної освіти / С. Гончаренко, В. Волков, Є. Коршак, О. Бугайов, І. Юрчук // Фізика та астрономія в школі. – 1997. – № 2. – С. 2 – 7.

57. Гончаренко С. Концептуальні основи державного стандарту загальної середньої школи / С. Гончаренко, О. Ляшенко, Ю. Мальований, О. Савченко // Фізика та астрономія в школі. – 1996. – № 1. – С. 6 – 10.

58. Гончаренко С.У. Методологические и теоретические основы формирования у учащихся средней школы естественнонаучной картины мира: автореф. дисс. на соискание уч. степени докт. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / С.У. Гончаренко. – К., 1989. – 56 с.

59. Гончаренко С.У. Фізика : [пробн. навч. посібник для 10 – х класів ліцеїв та гімназій природничо – наукового профілю] / С.У. Гончаренко. – К.: Освіта, 1995. – 430 с.

60. Гончаренко С.У. Формування наукового світогляду учнів під час вивчення фізики: посіб. [для вчителів] / С.У. Гончаренко. – К.: Рад. шк., 1990. – 208с.

61. Горский Д.П. Исследование по логике научного познания / Д.П. Горский. – М.: Наука, 1990. – 210 с.

62. Горский Д.П. Логический анализ моделей развития научного знания / Д.П. Горский, А.Д. Никифоров // Методология развития научного знания. Сборник статей. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – С. 34 – 58.

63. Готт В. С. Философские вопросы современной физики / В.С. Готт. – М.: Высшая школа, 1988. – 343 с.

64. Готт В.С. Категории современной науки: становление и развитие / В.С. Готт. – М.: Мысль, 1984. – 268 с.

65. Грабарь М. И. Применение математической статистики в педагогических исследованиях: Непараметрические методы / М. И. Грабарь, К. А. Краснянская. – М.: Педагогика, 1977. – 136 с.
66. Гриценко В.Г. Нові інформаційні технології при вивченні статистичних закономірностей у процесі підготовки вчителів фізики: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / В.Г. Гриценко. — К., 1999. — 20 с.
67. Грязнов Б.С. Логика, рациональность, творчество / Б.С. Грязнов. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
68. Гуревич А.Е. Экспериментальные программы курса физики для базового обучения / А.Е. Гуревич // Физика в школе. – 1990. – № 4. – С. 43 – 50.
69. Гуляева Л.В. Проблемно-модульний підхід до вивчення фізики в сучасній загальноосвітній школі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Л.В. Гуляева. — К., 2000. — 20 с.
70. Давыдов В.В. Виды обобщения в обучении (логико – гносеологические проблемы построения учебных предметов) / В.В. Давыдов. – М.: Педагогика, 1972. – 464 с.
71. Давыдов В.В. Проблемы развивающего обучения: Опыт теоретического и экспериментального психологического исследования / В.В. Давыдов. – М.: Педагогика, 1986. – 316 с.
72. Дариус Дж. Недоступное глазу / Дж. Дариус ; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 249 с.
73. Девис П. Суперсила / П. Девис; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 272 с.
74. Державна національна програма: “Освіта” (“Україна ХХІ століття”). – К.: Райдуга, 1994. – 49с.
75. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики / М. Джеммер ; пер. с англ. ; под ред. Л.И.Пономарева. – М.: Наука, 1985. – 384 с.
76. Дідовик М.В. Наступність фізико-математичної підготовки в ліцях і вищих навчальних закладах III-IV рівнів акредитації: автореф. дис. на

здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / М.В. Дідовик. — Вінниця, 2007. — 20 с.

77. Дидактические проблемы построения базового содержания образования : [сб. науч. трудов / под ред. И .Я. Лернера, И.К.Журавлева] — М.: Изд – во ИТП и МОИ РАО, 1993. — 210 с.

78. Дик Ю.И. Проблемы и основные направления развития школьного физического образования в Российской федерации : автореф. дисс. д-ра пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория та методика обучения (фізика)" / Ю.И. Дик. — М., 1996. — 59 с.

79. Диференціація навчання учнів у загальноосвітній школі : Методичні рекомендації. — К.: Освіта, 1992. — 31 с.

80. Доброхотова Т.А. Ассиметрия мозга и ассиметрия сознания человека / Т.А. Доброхотова, Н.Н. Брагина // Вопросы философии. — 1993. № 4. — С. 123 – 134.

81. Ердакова Л.Д. Роль принципов симметрии в формировании у студентов педагогических вузов представления о современной физической картине мира : дис. ... канд. пед. наук : спец. 13.00.02 " Теория и методика обучения (фізика)" / Ердакова Л.Д. — М., 1986. — 245 с.

82. Желудев И.С. Симметрия и ее приложения / И.С. Желудев. — М.: Энергоиздат, 1983. — 280 с.

83. Жог В.И. Пространство, время и симметрия в физических теориях / В.И. Жог. — М.: МГПИ., 1985. — 112 с.

84. Жук Ю.О. Характерні ознаки структури комп'ютерно-орієнтованого навчального середовища / Ю.О. Жук, О.М. Соколюк // Інформаційні технології і засоби навчання : [зб. наук. праць / за ред. В.Ю. Бикова, Ю.О. Жука ; інститут засобів навчання АПН України]. — К.: Атіка, 2005. — С. — 100 – 109.

85. Закалюжний В.М. Техніко-технологічний компонент змісту курсу фізики старшої школи як засіб формування пізнавальної мотивації учнів:

- автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / В.М. Закалюжний. — К., 2006. — 20 с.
86. Закота Л.А. Інтегрований курс "Природознавство" у школах Японії / Л.А. Закота, Г.В. Степанко // Методика викладання математики і фізики. — К.: Освіта, 1991. — № 7 — С. 150 — 156.
87. Засекіна Т.М. Використання системи дидактичних засобів в умовах диференційованого навчання фізики: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Т.М. Засекіна. — К., 2009. — 20 с.
88. Зверева Н.М. Формирование естественнонаучного мышления школьников в процессе обучения физике / Н.М. Зверева. — Л., 1986. — 49 с.
89. Зорина Л.Я. Формирование научной картины мира с помощью учебника физики (на материале физической картины мира) / Л.Я. Зорина // Проблемы школьного учебника, 1979. — № 7. — С. 168 — 177.
90. Ильченко В.Р. Формирование естественнонаучного миропонимания школьников : [кн. для учит.] / В.Р. Ильченко. — М.: Просвещение, 1993. — 192 с.
91. Ильченко В.Р. Формирование у учащихся средней школы естественнонаучного мировоззрения в процессе обучения : дис. ... канд. пед. наук : спец. 13.00.02 " Теория и методика обучения (физика)" / В.Р. Ильченко. — Київ, 1989. — 374 с.
92. Іваницький О.І. Теоретичні і методичні основи підготовки майбутнього вчителя фізики до впровадження інноваційних технологій навчання : дис. докт. пед. наук : спец. 13.00.02 " Теорія та методика навчання (фізика)" / О.І. Іваницький. — Запоріжжя, 2004. — 492 с.
93. Кабанова – Меллер Е.Н. Учебная деятельность и развивающееся обучение / Е.Н. Кабанова – Меллер. — М.: Просвещение, 1981. — 196 с.
94. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика: Статьи, выступления / П.Л. Капица. — [3-е изд., дополн.]. — М.: Наука, 1981. — 495 с.
95. Клайн М. Математика. Поиск истины / М. Клайн ; пер. с англ. ; под ред. Ю.В.Сачкова, В .И.Аршинова. — М.: Мир, 1988. — 295 с.

96. Ковальов І.З. Вчення про симетрію в курсі фізики середньої школи : дис. ... канд. пед. наук : спец. 13.00.02 " Теорія та методика навчання (фізика)" / І.З. Ковальов. – К., 1974. – 195 с.
97. Колмогоров А.Н. Основы теории вероятности / А.Н. Колмогоров. – М.: Наука, 1974. – 365 с.
98. Комп'ютер на уроках фізики : [посібник для вчителів] / М.І. Жалдак, Ю.К. Набочук, І.Л. Семещук. – Костопіль.: Ю РВП "РОСА", 2005. – 228 с.
99. Компанеец А.С. Симметрия в микро – и макромире / А.С. Компанеец. – М.: Наука, 1978. – 207 с.
100. Контроль знань учащихся по физике : [под редакцией В. Г. Разумовского, Р. Ф. Кривошаповой]. – М.: Просвещение, 1988 – 95 с.
101. Концепція неперервної фізичної освіти в навчальних закладах України // Проблеми удосконалення фундаментальної та професійної підготовки вчителів фізики. – К.: Рад. шк., 1996. – С. 7 – 19.
102. Концепція середньої загальноосвітньої школи України // Інф. зб. Міністерства Освіти України. – К., 1992. – № 17. – С. 4 – 12.
103. Корсун І.В. Активізація навчально-пізнавальної діяльності старшокласників у процесі вивчення властивостей твердих тіл у курсі фізики: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / І.В. Корсун. — К., 2009. — 20 с.
104. Коршак Є.В. Навіщо і як вивчають фізику / Є.В. Коршак // Фізика та астрономія в школі. – 1996. – № 1. – С.3 – 6.
105. Коршак Є.В. Методика і техніка шкільного фізичного експерименту : Практикум / Є.В. Коршак., Б.Ю. Миргородський – К.: Вища школа, 1981. – 279 с.
106. Крауфорд Ф. Волны. Серия: "Берклеевский курс физики" / Ф. Крауфорд. – М.: Наука, 1984.– Т.3. – 512 с.
107. Кремінський Б.Г. Формування сучасного наукового стилю мислення учнів в процесі навчання фізики : автореф. дис. на здобуття наук.

ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Б.Г. Кремінський. – К., 1997. – 24 с.

108. Кульчицький В.І. Вивчення електромагнітних хвиль на основі системи фундаментальних фізичних понять / В.І. Кульчицький // Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету. Серія: Педагогіка і психологія. – Тернопіль, 2006. – № 9. – С. 91 – 96.

109. Кульчицький В.І. Формування фундаментальних фізичних понять «електромагнітна взаємодія» та «електромагнітне поле» в учнів профільних класів у процесі вивчення спеціальної теорії відносності. / В.І. Кульчицький // Фізика та астрономія в школі, 2010. – № . – С. – .

110. Кульчицький В.І. Використання сучасних інформаційних технологій при вивченні електромагнітних хвиль на основі фундаментальних фізичних понять. / В.І. Кульчицький // Фізика та астрономія в школі, 2009. – № 3. – С. 38 – 42.

111. Кульчицький В.І. Генезис поняття ймовірності / В.І. Кульчицький, Б.Є. Будний, І.В. Козуб // Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету. Серія: Педагогіка і психологія. – Тернопіль, 1998. – № 5. – С. 127 – 132.

112. Кульчицький В.І. Демонстраційний експеримент по реєстрації індукції змінного магнітного поля : матеріали міжнар. конф. / В.І. Кульчицький // [Міжнародний семінар “Розвиток творчих здібностей учнів в процесі навчання фізики”], (Чернігів, 10 – 13 грудня 1996 р.). – Чернігів, 1996. – Т.2. – С. 3 – 5.

113. Кульчицький В.І. Дослідження навантажувальної характеристики та реєстрація магнітного поля розсіяння трансформатора / В.І. Кульчицький, Б.Є. Будний, В.В. Андрієвський, С.Ю. Вознюк // Фізика та астрономія в школі, 1997. – № 4. – С. 49 – 52.

114. Кульчицький В.І. Методичні засади побудови шкільного курсу електродинаміки на основі системи фундаментальних фізичних понять / В.І. Кульчицький // Наукові записки Тернопільського державного

педагогічного університету. Серія: Педагогіка і психологія. – Тернопіль, 2002. – № 6. – С. 92 – 94.

115. Кульчицький В.І. Про формування поняття електромагнітного поля у курсі фізики середньої школи на основі системи фундаментальних фізичних понять / В.І. Кульчицький, С.Ю. Вознюк // Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету. Серія: Педагогіка і психологія. – Тернопіль, 1999. – №. 1. – С. 128 – 134.

116. Кульчицький В.І. Про формування понять електромагнітна індукція та вихрове електричне поле у курсі фізики середньої школи / В.І. Кульчицький, С.Ю. Вознюк, В.Ю. Чопик // Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету. Серія: Педагогіка і психологія. – Тернопіль, 1998. – № 5. – С. 120 – 127.

117. Кульчицький В.І. Психолого – педагогічні аспекти формування фундаментальних фізичних понять / В.І. Кульчицький // Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету. Серія: Педагогіка і психологія. – Тернопіль, 1998. – № 2. – С. 94 – 96.

118. Кульчицький В.І. Формування поняття «електромагнітне поле» на основі фундаментальних фізичних понять / В.І. Кульчицький, С.Ю. Вознюк // Фізика та астрономія в школі, 1999. – № 4. – С. 43 – 47.

119. Кульчицький В.І. Формування фундаментальних фізичних понять під час вивчення світлових хвиль (профільні класи) / В.І. Кульчицький // Фізика та астрономія в школі, 2010. – № 2. – С. 34 – 40.

120. Кульчицький В.І. Формування уявлень про квантову теорію провідності металів на основі фундаментальних фізичних понять : матеріали Всеукр. конф. / В.І. Кульчицький // [Науково–методичний збірник “Методичні особливості викладання фізики на сучасному етапі”]. – Кіровоград, 1998. – С. 112 – 114.

121. Кун Т. Структура наукових революцій / Т. Кун. – М.: Прогресс, 1977. – 300 с.

122. Кухарчук Р.П. Розвиток творчих здібностей учнів при вивченні елементів електроніки на уроках фізики і в позаурочній роботі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Р.П. Кухарчук. — К., 2005. — 20 с.
123. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Квантовая механика. Нерелятивистская теория / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — [3-е изд.]. — М.: Наука, 1974. — Т.3. — 752 с.
124. Ланіна І.Я. Позакласна робота з фізики / І.Я. Ланіна ; пер. з російської. — К.: Рад. шк., 1983. — 223 с.
125. Леонтьев А.Н. Овладение учащимися научными понятиями как проблема педагогической психологии / А.Н. Леонтьев. — М.: Наука, 1978. — 210 с.
126. Лернер И.Я. Дидактическая система методов обучения / И.Я. Лернер. — М.: Педагогика, 1976. — 320 с.
127. Лукьянов А.В. Вероятность как категория научного познания / А.В. Лукьянов // История и методология естественных наук. — М., 1992. — № 37. — С. 39 — 46.
128. Ляшенко О.І. Взаємозв'язок теоретичного та емпіричного в навчанні фізики : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / О.І. Ляшенко. — К, 1996. — 50 с.
129. Ляшенко О.І. Формування фізичного знання в учнів середньої школи: логіко – дидактичні основи / О.І. Ляшенко. — К.: Генеза, 1996. — 128 с.
130. Ляшенко О.І. Концептуальні засади державного стандарту загальної середньої освіти / О.І. Ляшенко, Ю.І. Мальований // Проблеми освіти., — К.: ІЗИН, 1996. — № 5 — С. 22 — 26.
131. Максвелл Д. К. Избранные сочинения / Д. К. Максвелл. — М. : Гостехиздат, 1954. — 592 с.
132. Максвелл Д.К. Статьи и речи / Д.К. Максвелл. — М.: Наука, 1968. — 210 с.

133. Максвелл Д.К. Трактат об электричестве и магнетизме / Д.К. Максвелл. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
134. Малафеев Р.И. Проблемное обучение физике в средней школе / Р.И. Малафеев. – М.: Просвещение, 1980. – 127 с.
135. Мартинюк М.Т. Науково-методичні засади навчання фізики в основній школі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / М.Т. Мартинюк. — К., 1999. — 34 с.
136. Матвеев А.Н. Атомная физика : [учеб. пособие] / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1989. – 439 с.
137. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм : [учеб. пособие]. – М. : Высш. школа, 1983. – 463 с.
138. Межпредметные связи естественно–математических дисциплин : [пособие для учителей]: сб. ст. / под. ред. В.Н. Федоровой. – М.: Просвещение, 1980. – 208 с.
139. Методика викладання фізики: Респ. Науково – метод. зб. : [відповід. ред О.І. Бугайов]. – 1982. – №18. – 142 с.
140. Методы педагогических исследований / [В. И. Журавлев, Г. П. Ников, М. Н. Скаткин и др.] ; под ред. А. И. Пискунова, Г. В. Воробьева. – М.: Педагогика, 1979. –255 с.
141. Методологический анализ физического познания ; под. ред. Н. П. Деменчук. – К.: Наукова думка, 1985. – 279 с.
142. Мисліцька Н.А. Формування фізичних понять в учнів основної школи засобами інформаційних технологій навчання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Н.А. Мисліцька. — К., 2007. — 20 с.
143. Мисловська С.К. Методика використання електронних додатків до підручників фізики в основній школі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / С.К. Мисловська. — К., 2007. — 20 с.

144. Мостепаненко М.В. Философия и физическая теория: Физическая картина мира и проблема происхождения и развития физических теорий / М.В. Мостепаненко. – Л.: Наука, 1969. – 239 с.
145. Мощанский В.Н. Формирование научного мышления учащихся при обучении физике / В.Н. Мощанский // Физика в школе. – 1991. – № 4. – С. 16 – 19.
146. Мултановский В.В. Физические взаимодействия и картина мира в школьном курсе: Пособие для учителей / В.В. Мултановский. – М.: Просвещение, 1977. – 168 с.
147. Мултановський В.В. Проблема теоретических обобщений в курсе физики средней школы : автореф. дисс. на соиск. уч. степени докт. пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / В.В. Мултановський. – М., 1979. – 44 с.
148. Муляр В.П. Засоби інформаційних технологій у вивченні питань квантової фізики в середній школі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / В.П. Муляр. — К., 1999. — 17 с.
149. Мякишев Г.Я. Фізика : [навч. посібник для 11-х класів]. / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев. – К.: Освіта, 1992. – 296 с.
150. Мякишев Г.Я. Фізика: підруч. [для 10 кл. серед. шк.] / Г. Я. Мякишев, Буховцев Б. Б. — К.: Рад. шк., 1991. — 272 с.
151. Научные основы школьного курса физики ; под ред. С.Я. Шамаша, Э.Е. Эвенчик. – М.: Педагогика, 1985. – 240 с.
152. Непорожня Л.В. Методична система навчання хвильової і квантової оптики із застосуванням комп'ютерних технологій у загальноосвітніх навчальних закладах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Л.В. Непорожня. — К., 2008. — 20 с.
153. Ніколаєв О.М. Методичне забезпечення оперативного та тематичного контролю в умовах особистісно орієнтованого навчання фізики:

автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / О.М. Ніколаєв. — К., 2004. — 20 с.

154. Нишанов В.К. Когнитивный подход к проблеме понимания / В.К. Нишанов // Когнитивный аспект научной рациональности. — Фрунзе: Наука, 1989. — 215 с.

155. Нова концепція викладання фізики у середніх школах України (обґрунтування і програми). — Додаток "Методика" до газети "Освіта". — 20 березня 1996. — № 2.

156. Нугаев Р.М. Реконструкция процесса смены фундаментальных научных теорий / Р.М. Нугаев. — Казань: Наука, 1989. — 208 с.

157. Озадовская Л.В. Гносеологический статус понятий в релятивистской физике / Л.В.Озадовская. — К.: Наукова думка, 1975. — 160 с.

158. Орієнтовне тематичне планування з фізики та астрономії, 8 клас. Навчально : [методичний посібник] / О.І. Бугайов, М.Т. Мартинюк, В.В. Смолянець, Д.Я. Костюкевич, Л.Г. Грищенко, Й.Ю. Замаховський. — К.: Освіта, 1997. — 96 с.

159. Основы методики преподавания физики в средней школе ; под ред. А.В. Перышкина, В.Г. Разумовського, Ф.А. Фабриканта. — М.: Просвещение, 1984. — 398 с.

160. Павленко А.І. Методика навчання учнів середньої школи розв'язуванню і складанню фізичних задач (теоретичні основи) : [наук. ред.. С.У. Гончаренко]. — К.: ТОВ "Міжнар. фін. агенція", 1997. — 177 с.

161. Пайкуш М.А. Підготовка майбутнього вчителя до профільного навчання фізики в загальноосвітніх закладах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / М.А. Пайкуш. — Вінниця, 2007. — 20 с.

162. Парселл. Э. Электричество и магнетизм. Серия "Берклевский курс физики" / Э Парселл. — М.: Наука, Главная редакция физико – математической литературы, 1983. — Т.2. — 416 с.

163. Паули В. Теория относительности / В. Паули ; пер. с англ. – [3–е изд.]. – М.: Наука, 1981. – 328 с.
164. Пиаже Ж. Избранные психологические труды / Ж. Пиаже. – М.: Просвещение, 1969. – 659 с.
165. Пинский А.А. Метод модельных гипотез как метод познания и объект изучения / А.А. Пинский, В.Г. Разумовский // Физика в школе. – 1997. – № 3. – С. 30 – 36.
166. Повар С.В. Інтеграція знань з фізики і математики як засіб формування творчого мислення старшокласників: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / С.В. Повар. — К., 2007. — 20 с.
167. Поліхун Н.І. Розвиток творчої діяльності старшокласників у процесі навчання фізики з використанням проектної технології: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Н.І. Поліхун. — К., 2007. — 21 с.
168. Попова Т.М. Методичні засади розвитку системи задач з механіки у класах з поглибленим вивченням фізики: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Т.М. Попова. — К., 2004. — 20 с.
169. Поппер К. Логика и рост научного знания / К. Поппер [избр. работы]. – М.: Наука, 1983. – 220 с.
170. Принцип соответствия. Историко – методологический анализ. – М.: Наука, 1979. – 317 с.
171. Принцип симметрии. Историко – методологические проблемы. – М.: Наука, 1978. – 397 с.
172. Програма для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика 10 – 12 класи (профільний рівень). – К.: Перун, 2009. – 19с.
173. Програма для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика 10 – 12 класи (академічний рівень). – К.: Перун, 2005. – 18с.

174. Програма для загальноосвітніх навчальних закладів. Програма з математики для 10 – 12 класів загальноосвітніх навчальних закладів (профільний рівень). – К.: Перун, 2009. – 30с.

175. Пурешева Н.С. Методические основы дифференцированного обучения физике в средней школе : автореф. дисс. докт. пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / Н.С. Пурешева. – М., 1995. – 35 с.

176. Разумовский В.Г. Проблемы обучения физике в условиях дифференциации образования / В.Г. Разумовский // Физика в школе. – 1991. – № 1. – С. 3 – 5.

177. Рибалко А.В. Система дослідницьких задач як засіб розвитку продуктивного мислення старшокласників у навчанні фізики: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / А.В. Рибалко. — К., 2007. — 21 с.

178. Рижко В. А. Концепція як форма наукового знання / В. А. Рижко. – К.: Наукова думка, 1995. – 212 с.

179. Российский стандарт школьного физического образования // Физика в школе. – 1994. – № 2. – С. 4 – 11.

180. Руденко О. С. Методика обучения основам теории относительности в средней школе (онтодидактический аспект) : дис. ... канд. пед. наук : спец. 13.00.02 " Теория и методика обучения (физика)" / О.С. Руденко. – К., 1985. – 139 с.

181. Сабитов М. Формирование и развитие квантовой механики і логико – гносеологический анализ / М. Сабитов. – Алма – Ата: Наука, 1984. – 144 с.

182. Савельев И. В. Курс общей физики: [учеб. пособие. В 3 – х т.]. Т 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – [3 – е изд., испр.]. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1988. – Т.2. – 496с.

183. Савельев И. В. Курс общей физики. : [учеб. пособие. В 3 – х т.] Т 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного

ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. – [3 – е изд., испр.]. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1987. – Т.3. – 320 с.

184. Савченко В.И. Система упражнений и лабораторных работ как средство повышения эффективности изучения физики атома и атомного ядра в средней школе : автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" / В.И. Савченко. – К., 1980. – 26 с.

185. Салюкова А.А. Принцип симметрии в курсе физики средней школы : дис. канд. пед. наук : спец. 13.00.02 " Теория и методика обучения (физика)" / А.А. Салюкова. – М., 1972. – 162 с.

186. Садовий М.І. Теоретичні та методичні основи становлення та розвитку фундаментальних ідей дискретності та неперервності в курсі фізики загальноосвітньої школи: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / М.І. Садовий. – К, 2001. – 37 с.

187. Сачков Ю.В. Теория познания и современная физика / Ю.В. Сачков, А.С. Кравец, Г. Герц. – М.: Наука, 1984 – 286 с.

188. Свистунов О.Ю. Модельний експеримент як засіб формування наукових понять у старшокласників у процесі вивчення електродинаміки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / О.Ю. Свистунов. — К., 2008. — 20 с.

189. Семерня О.М. Дидактичні основи використання еталонних вимірників якості знань у навчанні фізики старшокласників: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / О.М. Семерня. — К., 2007. — 20 с.

190. Сергеев А. В. Мысли о создании концепции школьной физики / А.В. Сергеев // Физика в школе. – 1991. – №1. – С. 30 – 31.

191. Сергеев А.В. Становление и развитие истории методики преподавания физики в средней школе как научная дисциплина : автореф. дисс.

докт. пед. наук: спец. 13.00.02 "Теория и методика обучения (физика)" Росс. гос. пед. ун – т им. А.И. Герцена / А.В. Сергеев. – Л., 1991. – 34 с.

192. Сільвейстр А.М. Активізація пізнавальної діяльності учнів на уроках вивчення нового навчального матеріалу з електродинаміки з застосуванням комп'ютера: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / А.М. Сільвейстр. — К., 2000. — 19 с.

193. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1980. – Т.4. – 752 с.

194. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество / Д.В. Сивухин. – М.: Наука. Главная редакция физико – математической литературы, 1977. – Т.3. – 688 с.

195. Сірик Е.П. Дидактичні основи розробки та використання сучасних джерел випромінювання у шкільному фізичному експерименті: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / Е.П. Сірик. — К., 2007. — 20 с.

196. Скаткин М.Н. Качество знаний учащихся и пути его совершенствования / М.Н. Скаткин. – М.: Педагогика, 1978. – 208 с.

197. Смородинский Я.А. Неопределенность: победы и поражения Вернера Гейзенберга / Я.А. Смородинский // УФН. – 1991. – Т.162. – № 11. – С. 201 – 205.

198. Современная практика: теория – практике : [под ред. И.Я. Лернера, И.К. Журавлева]. – М.: Изд-во ИТП и МИР РАО, 1993. – 288 с.

199. Стадніченко С.М. Методика вивчення молекулярної фізики на основі особистісно орієнтованої технології в умовах профільного навчання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / С.М. Стадніченко. — К., 2007. — 20 с.

200. Стандарти фізичної освіти в середній школі України : матеріали науково – методичної конференції / [упор.: В.Ф. Савченко, М.М. Дідович, А.А. Давидьон]. – Чернігів, 1996. – 94 с.

201. Стандарти фізичної освіти в Україні і технологічні аспекти управління навчально – пізнавальною діяльністю : [наук – метод. зб. ; відповід. наук. ред.. Є.В. Коршак, П.С. Атаманчук]. – Кам'янець – Подільський , 1997. – 110 с.
202. Стретди Дж. Введение в суперсимметрию / Дж. Стретди // Введение в супергравитацию. – М. , 1985. – С. 19 – 35.
203. Сычевская З.В. Проверка результативности обучения физике : [пособие для учителей] / З.В. Сычевская, В.В. Смолянец, А.Г. Бовтрук. – К.: Рад. школа, 1986. – 175 с.
204. Сусь Б. А. Проблемы дидактики физики у вищій школі: Лекції, лекційні демонстрації, лабораторний практикум — [2. вид.]. / Б. А.Сусь, М. І. Шут. — К. : ВЦ "Просвіта", 2003. — 155с.
205. Талызина Н.Ф. Управление процессом усвоения знаний / Н.Ф. Талызина – М.: Изд – во МГУ, 1975. – 343 с.
206. Тарасов Л. В. Мир построенный на вероятности : [книга для учащихся]. – М.: Просвещение, 1984. – 191 с.
207. Тарасов Л.В. Необходимость перестройки преподавания естественных предметов на основе интегративно – гуманитарного подхода / Л.В. Тарасов // Физика в школе. – 1989. – № 4. – С. 32–44.
208. Тарасов Л.В. Современная физика в средней школе / Л.В. Тарасов. – М.: Просвещение, 1990.– 287 с.
209. Тарасов Л.В. Этот удивительный симметричный мир : [пособие для учащихся] / Л.В. Тарасов. – М.: Просвещение, 1982. – 176 с.
210. Теория познания и современная физика. – Новосибирск : Наука, 1984. – 336 с.
211. Тредер Г.Ю. Эволюция основных физических идей / Г.Ю. Тредер. – М.: Мир, 1982. – 196 с.
212. Уитл Н. Вероятность / Н. Уитл. – М.: Наука, 1982. – 240 с.
213. Усова А.В. Формирование у школьников научных понятий в процессе обучения / А.В. Усова. – М.: Педагогика, 1986. – 176 с.

214. Усова А.В. Воспитание учащихся в процессе обучения физике / А.В. Усова, В.В. Завьялов. – М.: Просвещение, 1984. – 143 с.
215. Утияма Р. ОТО и квантовая механика / Р. Утияма // Перспективы квантовой физики. – К., 1982. – С. 480 – 520.
216. Фабрикант В.А. Проблемы преподавания физики / В.А. Фабрикант. – М.: Просвещение, 1978. – 138 с.
217. Фейнман Р. Вероятность и неопределенность – квантово – механический взгляд на природу / Р. Фейнман // Характер физических законов. – М., 1968. – С. 137–162.
218. Фейнман Р. Квантовая электродинамика / Р. Фейнман. – М.: Наука, . 1964. – 219 с.
219. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Излучение. Волны. Кванты. Кинематика. Теплота. Звук / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сендс : [пер. с англ. ; 3 – е изд.]. – М.: Мир, 1976. – Т.3 – 4. – 496 с.
220. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Электродинамика / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1966. – Т.6. – 344 с.
221. Физическая теория (философско – методологический анализ). – М.: Наука, 1980. – 463 с.
222. Физический энциклопедический словарь. — М.: Сов. энциклопедия, 1984. — 944 с.
223. Фуцич В.И. Симметрия уравнений Максвелла / В.И. Фуцич, А.Г. Никитин. – К.: Наукова думка, 1983. – 200 с.
224. Хунд Ф. Претория квантовой теории : [пер. с нем.; под ред. М.А.Ельяшевича] / Ф. Хунд. – К.: Наукова думка, 1980. – 244 с.
225. Цатурян А.М. Методологический принцип симметрии в курсе физики средней школы : дис. канд. пед. наук : спец. 13.00.02 " Теория и методика обучения (физика)" / А.М. Цатурян – Л., 1991. – 177 с.
226. Черепанов В.С. Экспертные оценки в педагогических исследования / В.С. Черепанов. – М.: Педагогика, 1989. – 152 с.

227. Чернявський В.В. Розвиток мислення учнів під час вивчення фізики за модульною технологією (на матеріалі електродинаміки): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. пед. наук : спец. 13.00.02 "Теорія та методика навчання (фізика)" / В.В. Чернявський. — К., 2007. — 21 с.
228. Шварц К. Поиски закономерностей в физическом мире / К. Шварц, Г. Гольдфарб. — М.: Мир, 1977. — 357 с.
229. Шмутцер Э. Теория относительности. Современные представления / Э. Шмутцер — М.: Мир, 1981. — 232 с.
230. Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике / Э. Шредингер. — М.: Наука, 1976. — 422 с.
231. Шут М.І. Фізика. Поради абітурієнтам — [2-е вид.]. / М.І. Шут. — К. : НПУ ім.М.П.Драгоманова, 2002. — 56с.
232. Шут М.І. Вибрані питання історії молекулярної фізики (XVIII-початок XX ст.): [навч. посібник] / М.І. Шут, Н.П. Форостяна. — К. : Шлях, 2003. — 152с.
233. Шут М.І. Демонстраційний експеримент з фізики: [навч. посіб.] / [М.І. Шут, В.Ю.Биков, О.М.Кучменко, І.І.Адаменко, Ю.О. Жук]; під ред. М.І. Шута. — К. : НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2003. — 234с.
234. Шут М.І. "Мова" фізики: [навч. посібник]. / М.І. Шут, П.В. Бережний, А.В. Касперський. — К. : НПУ, 2000. — 37с.
235. Шут М.І. Науково – дослідна робота з фізики у середніх та вищих навчальних закладах: [навч. посібник]. / М.І Шут, В.П. Сергієнко. — К. : Шкільний світ, 2004. — 128с.
236. Шут М.І. Електрика та магнетизм: [навч.-метод. посіб. для самот. роботи] / М.І. Шут. — К., 2002. — 236 с.
237. Эйнштейн А. Геометрия и опыт / А. Эйнштейн : [собр. науч. трудов. Работы по теории относительности 1921–1925]. — М., 1966. — Т.2. — С. 83 – 94.
238. Эйнштейн А. Зависит ли инерция тела от содержащейся в ней энергии / А. Эйнштейн // Принцип относительности. — М., 1973. — С. 161 – 163.

239. Эйнштейн А. О понятии пространства / А. Эйнштейн // Вопросы философии. – 1957. – № 3. – С. 120 – 156.
240. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики. 1901 – 1955 / А. Эйнштейн. – М.: Наука, 1966. – Т.3. – 632 с.
241. Эйнштейн А. Физика и реальность / А. Эйнштейн. – М.: Наука, 1965. – 359 с.
242. Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел / А. Эйнштейн // Принцип относительности. – М., 1973. – С. 97 – 118.
243. Эллиот Дж. Симметрия в физике / Дж. Эллиот, П. Добер. – М.: Мир, 1983. – 360 с.
244. Яворский Б.М. Основы физики / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М.: Наука, 1974. – Т.2.– 448 с.
245. Яворский Б.М. Основы физики / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М.: Наука, 1974. – Т.1. – 496 с.
246. Salach Jadviga. Fizyka z astronomia II:[klasy II liceum ogólnokształcącego o profilu podstawowym, biologiczno - chemicznym i matematyczno – fizycznym. Wydanie dziewiąte]. / Jadviga Salach, Barbara Sagnowska, Jerzy M. Kreiner. – Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1996. – 320 с.
247. Ginter Jerzy. Fizyka III: :[klasy III liceum ogólnokształcącego o profilu podstawowym, biologiczno - chemicznym i matematyczno – fizycznym. Wydanie osme]. / Jerzy Ginter. – Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1997. – 352 с.

ДОДАТОК А

Результати експериментального дослідження і їх обробка.

А.1. Анкета 1.

Насамперед вдячні за надану інформацію.

Вкажіть Ваше прізвище, ім'я, по-батькові.

Вкажіть вищий учбовий заклад, випускником якого Ви є, а також рік закінчення навчання і отриману спеціальність.

Вкажіть місце роботи і посаду.

Вкажіть стаж роботи за спеціальністю “Вчитель фізики”.

Вкажіть, в яких класах проводити заняття по фізиці і кількість паралельних класів.

Яка частина учнів, на Вашу думку, проявляє інтерес до вивчення фізики (вказіть в процентах)?

Чи відповідає зміст шкільного курсу фізики сучасному розвитку науки і техніки (чи достатньо висвітлюються у шкільному курсі поняття, закони і теорії, що розкривають головне у науці, складають основу наукового світорозуміння)?

Чи фігурують у шкільному курсі електродинаміки поняття, на основі яких генералізується навчальний матеріал, і які водночас є універсальними засобами пізнання?

Чи досягнута у курсі електродинаміки єдність наукових понять із сучасними науковими теоріями, в яких використовуються ці поняття?

А) досягнута повністю;

Б) не досягнута у параграфах.

Чи відповідають трактування і методи введення основних понять у шкільному курсі фізики їх розумінню у сучасній науці і прийнятому науковому трактуванню?

А) відповідає повністю;

Б) не відповідає у параграфах.

Чи наявні у шкільному курсі електродинаміки науково обґрунтовані теоретичні положення, світоглядні узагальнення, поняття, які дозволяють показати методи наукового пізнання?

- А) є в достатній кількості;
- Б) не достатні.

Чи висвітлюється у шкільному курсі електродинаміки еволюція понять і ідей?

Чи наявний матеріал, що виробляє у учнів розуміння необхідності експериментальної перевірки і границь застосовності понять теорій?

Чи структурується навчальний матеріал курсу електродинаміки на основі фундаментальних фізичних понять (симетрії, відносності, невизначеності, і т.д.)?

Чи достатня методична ступінь розкриття основних структурних елементів навчального матеріалу? Яку роль при цьому виконують загальнонаукові поняття?

Чи методично доцільно і вдала поетапність формування і розкриття понять у шкільному курс фізики з точки зору сучасних фізичних теорій?

Із якими труднощами Ви зустрічаєтесь при формуванні понять у шкільному курсі фізики (електродинаміки):

А) накопиченні експериментальних даних і створенні “понятійної” бази для введення нового поняття;

Б) виборі і науковому аналізі конкретної ситуації, що забезпечує виникнення у свідомості учнів нового поняття; використання модельних уявлень;

В) аналіз виучуваного об’єкту чи явища і виявлення його зв’язків з іншими;

Г) формування означення поняття;

Д) конкретизації і розвитку поняття.

Е) відсутності у шкільному курсі фізики понять на основі яких здійснюється структурування і генералізація навчального матеріалу;

Є) відсутності у шкільному курсі фізики загальнонаукових категорій, які є водночас універсальними засобами пізнання і конструктивними елементами сучасних фізичних теорій.

Чи проводити Ви формування понять у курсі шкільної фізики на основі фундаментальних фізичних понять:

А) так;

Б) ні.

Якщо відповідь на попереднє питання “так”, то скільки часу і коли Ви виділяєте на навчання? Вкажіть етапи навчання, їх мету, способи і засоби здійснення.

Чи використовуєте Ви в якості бази для формування понять шкільного курсу фізики фундаментальні фізичні поняття?

Яким узагальненим планом (схемою) Ви користуєтесь для організації процесу формування фундаментальних фізичних понять і понять курсу шкільної фізики?

Чи підвищує ефективність навчання, засвоєння та розуміння матеріалу курсу фізики, введення фундаментальних фізичних понять і конструювання на їх основі навчального матеріалу у шкільному курсі фізики?

A.1. Анкета 2.

Насамперед вдячні за надану інформацію.

Вкажіть Ваше прізвище, ім'я, по-батькові.

Вкажіть місце роботи, посаду, вчену ступінь.

Вкажіть вищий учбовий заклад, випускником якого Ви є, а також рік закінчення навчання і отриману спеціальність.

Вкажіть стаж роботи за спеціальністю “Вчитель фізики” або науково-педагогічний стаж.

Розставте у порядку зниження значущості властивості, наявність яких важлива для розробленої методики вивчення електродинаміки на основі

фундаментальних фізичних понять (ФФП) (визначте ранг критерію оцінювання розробленої методики):

А) має логічну несуперечливість і естетичну привабливість;

Б) надає можливості цілеспрямовано діяти на засвоєння конкретно-наукових знань;

В) систематизує курс електродинаміки, що дозволяє економити час на вивчення матеріалу;

Г) дозволяє виховувати в учнів ціннісно значуще відношення до фізичних явищ і процесів;

Д) дозволяє формувати в учнів сучасні методи наукового пізнання і застосовувати ці методи на практиці;

Е) дозволяє генералізувати навчальний матеріал на основі стержневих ідей сучасної фізики і розвивати в учнів науково-теоретичне мислення.

Критерій (властивість)	А	Б	В	Г	Д	Е
Ранг критерію (Q) (значущість властивості)						

Вкажіть відносну значущість властивості (критерію оцінювання) розробленої методики вивчення шкільного курсу електродинаміки на основі ФФП для визначення її оптимальності (приймати умовно сумарну відносну значущість перерахованих у п. 5 властивостей рівною 100):

Критерій (властивість)	А	Б	В	Г	Д	Е
Відносна значущість критерію (Z)						

Оцініть за 10-бальною шкалою вираженість перерахованих у п. 5 властивостей у традиційній методиці викладання електродинаміки:

Критерій (властивість)	А	Б	В	Г	Д	Е
Відповідність критерію (вираженість властивості) (K)						

Оцініть за 10-бальною шкалою вираженість перерахованих у п. 5 властивостей у структурі експериментального вивчення шкільного курсу електродинаміки на основі ФФП (визначте відповідність критеріям оцінювання експериментальних структур).

Критерій (властивість)		А	Б	В	Г	Д	Е
Відповідність критерію (вираженість властивості) (К)	Методика вивчення електродинаміки на основі ФФП						
	Електричне поле Магнітне поле Закони постійного струму Електричний струм у різних середовищах Електромагнітне поле Електромагнітні коливання Електромагнітні хвилі Світлові хвилі СТВ						

Якими ще властивостями, позитивними чи негативним, крім перерахованих у п. 5 володіє, на Вашу думку, розроблена методика вивчення шкільного курсу електродинаміки на основі ФФП?

Які перетворення, на Вашу думку, потрібно здійснити у експериментально розробленій методиці вивчення електродинаміки з метою її вдосконалення (обґрунтувати)?

Чи вважаєте Ви доцільним впровадження розробленої методики вивчення електродинаміки на основі ФФП в практику вивчення фізики в середній школі (непотрібне закреслити):

- А) не доцільно;
- Б) доцільно при врахуванні зауважень п. 10;
- В) доцільно без істотних змін.

А.2. Експертні оцінки рангу і відносної значущості критеріїв оцінювання методики формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки (група А)

Таблиця А.2

№ (j)	Ранг критерію і, присвоєний експертом j (Q_{ij}^A)							№ (j)	Відносна значущість критерію і на думку експерту j (Z_{ij}^A)						
	Е	Б	Г	Д	В	А	$\sum_j Q_{ij}^A$		Е	Б	Г	Д	В	А	$\sum_j Z_{ij}^A$
1	1	2	3	4	5	6	21	1	30	15	15	20	10	10	100
2	1	2	3	4	5	6	21	2	25	20	20	15	10	10	100
3	1	4	3	2	5	6	21	3	35	20	15	15	10	5	100
4	1	2	3	5	4	6	21	4	25	25	15	20	10	5	100
5	1	3	2	4	5	6	21	5	30	25	15	15	8	7	100
6	1	3	2	5	4	6	21	6	30	15	20	10	15	10	100
7	1	3	2	4	6	5	21	7	35	25	10	15	10	5	100
8	1	2	4	3	5	6	21	8	30	20	20	15	5	10	100
9	1	2	3	5	4	6	21	9	25	25	15	10	15	10	100
10	1	2	4	3	6	5	21	10	40	20	15	10	8	7	100
11	1	2	5	3	4	6	21	11	35	25	10	15	10	5	100
$\sum_j Q_{ij}^A = Q_i^A$	11	27	34	42	53	64	231	Z_{ij}^A	340	235	170	160	111	84	1100
i^A	1	2	3	4	5	6		i^A	1	2	3	4	5	6	
Q_i^A	1,00	2,45	3,09	3,81	4,81	5,81		Z_i^A	30,9	21,36	15,45	14,54	10,09	7,63	

А.3. Експертні оцінки рангу і відносної значущості критеріїв оцінювання методики формування ФФП в учнів профільних класів у процесі вивчення електродинаміки (група В)

Таблиця А.3

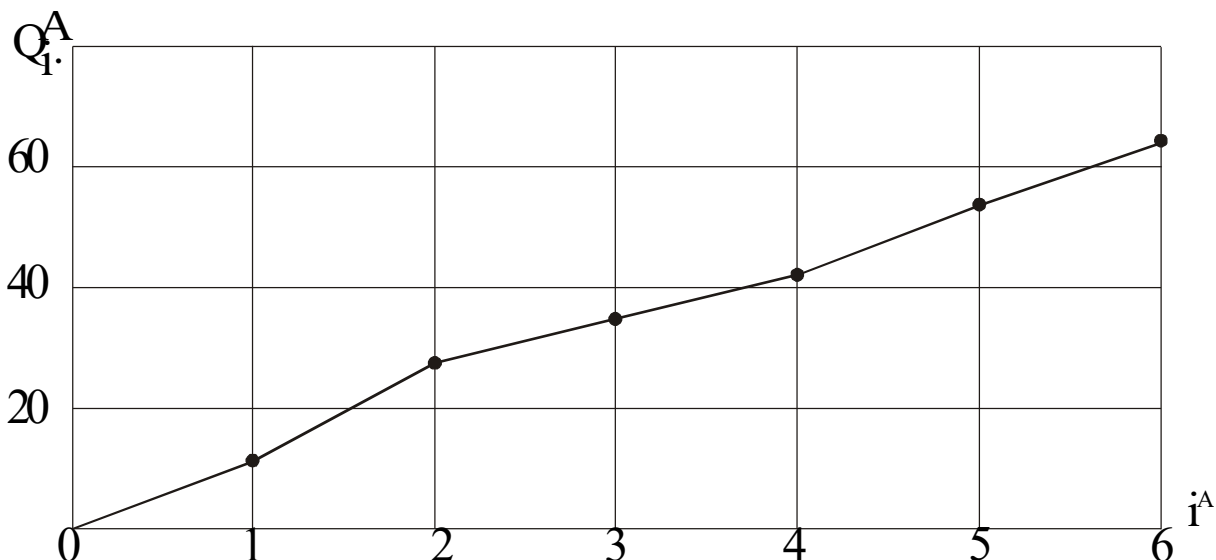
№ (j)	Ранг критерію і, присвоєний експертом j (Q_{ij}^B)							№ (j)	Відносна значущість критерію і на думку експерту j (Z_{ij}^B)						
	Е	Б	Д	Г	В	А	$\sum_j Q_{ij}^B$		Е	Б	Д	Г	В	А	$\sum_j Z_{ij}^B$
1	2						3	4	5						6
1	1	3	2	4	5	6	21	1	50	10	20	10	5	5	100
2	1	3	2	5	6	4	21	2	30	20	15	4	1	30	100
3	1	2	3	4	5	6	21	3	35	20	20	15	5	5	100
4	2	1	4	3	6	5	21	4	25	30	15	15	5	10	100
5	1	4	2	3	5	6	21	5	40	5	25	25	3	2	100
6	1	4	2	3	6	5	21	6	35	15	25	15	5	5	100
7	3	1	2	5	4	6	21	7	20	30	30	9	10	1	100
8	1	2	4	3	5	6	21	8	35	22	6	22	10	5	100
9	1	3	2	4	5	6	21	9	40	20	25	5	5	5	100
10	1	2	3	4	6	5	21	10	30	25	25	10	5	5	100
11	1	2	3	4	6	5	21	11	30	20	20	10	10	10	100
12	1	2	5	6	4	3	21	12	40	15	10	10	15	10	100
13	1	4	2	3	5	6	21	13	30	15	20	20	10	5	100
14	1	2	3	4	5	6	21	14	30	25	22	13	8	2	100
15	1	5	2	3	6	4	21	15	40	5	25	10	5	15	100

Продовження табл. А.3

1	2						3	4	5						6
16	1	2	4	3	5	6	21	16	35	30	10	10	10	5	100
17	1	4	2	3	5	6	21	17	35	5	30	20	5	5	100
18	1	5	2	3	4	6	21	18	40	5	15	20	15	5	100
19	1	3	2	4	6	5	21	19	35	15	30	10	0	10	100
20	1	2	4	3	6	5	21	20	40	30	10	10	3	7	100
21	1	3	4	2	5	6	21	21	40	20	10	20	5	5	100
22	1	2	5	3	6	4	21	22	40	30	10	10	5	5	100
23	1	2	5	4	3	6	21	23	20	30	12	12	20	6	100
24	1	5	3	2	4	6	21	24	35	10	20	20	10	5	100
25	1	1	4	3	6	5	21	25	10	30	15	30	10	5	100
26	1	4	2	5	3	6	21	26	25	15	25	10	20	5	100
27	1	3	2	4	5	6	21	27	30	15	25	15	10	5	100
28	1	4	2	3	6	5	21	28	30	10	25	25	5	5	100
29	1	5	4	3	2	6	21	29	40	5	30	10	10	5	100
30	1	2	3	4	5	6	21	30	30	30	20	10	5	5	100
31	1	3	2	4	6	5	21	31	25	25	20	15	10	5	100
32	1	3	5	2	6	4	21	32	30	25	10	10	10	15	100
$\sum_j Q_{ij}^B = Q_i^B$	36	93	96	113	162	172	672	Z_{ij}^A	1050	607	620	450	255	218	3200
i^B	1	2	3	4	5	6		I^A	1	3	2	4	5	6	
\bar{Q}_i^B	1,12	2,90	3,00	3,53	5,06	5,37		Z_i^A	32,81	18,96	19,37	14,06	7,96	6,81	

А.4. Перевірка узгодженості експертних оцінок рангів критеріїв (група А)

1). Перевірка лінійності залежності $Q_i^A = Q_i^A(i)$.



2). Обчислення коефіцієнту конкордації W М.Кендалла (n=6; m=11).

Таблиця А.4

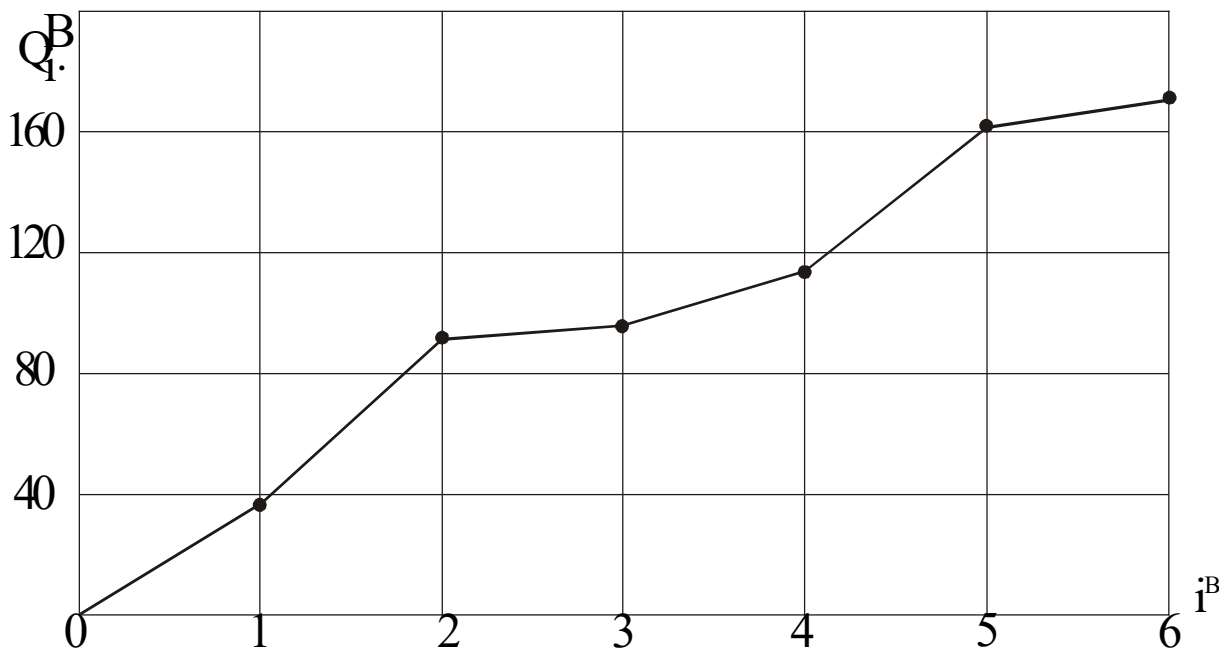
i^A	1(Е)	2(Б)	3(Г)	4(Д)	5(В)	6(А)
$Q_i^A = \sum_{j=1}^m Q_{ij}^A$	11	27	34	42	53	64
$\frac{Q_i^A}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m Q_{ij}^A$	38,5					
$\Delta_i^A = Q_i^A - \frac{Q_i^A}{n}$	-27,5	-11,5	-4,5	3,5	14,5	25,5
$(\Delta_i^A)^2$	756,3	132,3	20,3	12,3	210,3	650,3

$$S^A = \sum_{i=1}^n (\Delta_i^A)^2 = 1781$$

$$S_{\max}^A = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) = 211,5$$

$$W^A = \frac{S^A}{S_{\max}^A} = 0,84$$

А.5. Перевірка узгодженості експертних оцінок рангів критеріїв (група В)



1). Перевірка лінійності залежності $Q_i^B = Q_i^B(i)$.

2). Обчислення коефіцієнту конкордації W М.Кендалла ($n=6$; $m=32$).

Таблиця А.5

i^B	1(Е)	2(Б)	3(Д)	4(Г)	5(В)	6(А)
$Q_i^B = \sum_{j=1}^m Q_{ij}^B$	36	93	96	113	162	170
$\frac{Q_{..}^B}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ij}^B$	112					
$\Delta_i^B = Q_i^B - \frac{Q_{..}^B}{n}$	-76	-19	-16	1	50	60
$(\Delta_i^B)^2$	5776	361	256	1	2500	3600

$$S^B = \sum_{i=1}^n (\Delta_i^B)^2 = 1249$$

$$S_{\max}^B = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) = 1792$$

$$W^B = \frac{S^B}{S_{\max}^B} = 0,69$$

А.6. Перевірка узгодженості кінцевих рангів оцінок, присвоєних критеріям експертами груп А і В за Спірменом.

Коефіцієнт рангової кореляції Спірмена:

$$\rho_{A,B} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)},$$

де d_i — різниця рангів, присвоєних одному і тому ж критерію експертами груп А і В ($d_i = i^A - i^B$);

n — кількість критеріїв, що підлягають оцінюванню (ранжуванню).

Згідно таблиць А.4 і А.5 “Додатку А” з врахуванням $n=6$, маємо:

$$\rho_{A,B} = 1 - \frac{6((1-1)^2 + (2-2)^2 + (3-4)^2 + (4-3)^2 + (5-5)^2 + (6-6)^2)}{6(6^2 - 1)} = 0,95$$

А.7. Оцінка відповідності критеріям традиційної (Т) і експериментальної (Е) методик вивчення електродинаміки (група А)

Таблиця А.6

Порядковий номер критерію (і)	$K_{ij(T)}^A$						$K_{ij(E)}^A$					
	Е	Б	Г	Д	В	А	Е	Б	Г	Д	В	А
Порядковий номер експерту (j)	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	3	5	6	5	4	5	10	8	8	9	7	8
2	4	4	7	5	6	6	9	8	7	8	7	9
3	4	5	5	5	4	5	9	8	9	9	6	7
4	3	5	6	5	5	6	9	8	7	7	7	8
5	4	6	6	6	6	5	9	7	6	6	6	8
6	5	6	6	6	4	6	8	9	8	8	6	9
7	3	4	6	5	4	4	10	8	7	9	6	9
8	4	5	5	6	4	6	9	9	8	8	7	9
9	5	4	6	7	4	5	8	8	7	8	7	8
10	4	5	4	6	4	4	9	10	8	9	8	10
11	3	4	5	5	5	5	10	8	7	9	8	10
$\sum_j K_{ij}^A$	42	53	62	61	50	57	100	91	82	90	75	95
\bar{K}_i^A	3,81	4,81	5,63	5,54	4,55	5,18	9,09	8,27	7,45	8,18	6,81	8,63

**А.8. Оцінка відповідності критеріям традиційної (Т) і експериментальної (Е) методик вивчення електродинаміки
(група В)**

Таблиця А.7

Порядковий номер критерію (і)	$K_{ij(T)}^B$						$K_{ij(E)}^B$					
	Е	Б	Д	Г	В	А	Е	Б	Д	Г	В	А
Порядковий номер експерту (j)	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	2						3					
1	4	3	4	2	2	2	10	8	9	10	8	8
2	3	4	3	4	5	4	8	8	9	8	8	7
3	4	4	6	4	7	3	9	8	9	9	6	8
4	3	7	4	1	8	4	10	8	10	10	8	9
5	2	3	2	2	5	3	10	10	10	10	5	10
6	3	4	5	3	3	4	10	8	10	10	7	10
7	7	6	5	8	6	4	8	9	7	7	7	8
8	4	5	2	2	5	4	10	10	10	10	10	10
9	4	3	6	3	3	2	10	10	10	10	10	10
10	6	6	4	4	8	4	10	10	8	10	5	10
11	9	7	4	4	4	5	10	8	8	7	7	7
12	4	3	6	4	3	3	10	10	10	10	9	10
13	4	3	3	6	4	4	10	9	9	8	9	8

Продовження табл. А.7

1	2						3					
14	4	4	4	3	3	4	10	7	10	10	6	10
15	3	3	2	2	2	2	10	6	10	8	10	10
16	1	2	2	3	4	3	10	8	10	10	9	10
17	4	4	2	3	5	4	10	9	10	10	10	10
18	5	4	3	4	5	4	9	6	7	8	7	7
19	2	4	1	2	5	3	9	9	8	7	6	9
20	4	6	3	4	3	4	10	7	8	7	8	9
21	4	4	3	5	3	5	10	9	9	10	9	10
22	4	3	2	3	3	3	10	9	10	9	10	10
23	3	4	2	4	5	3	10	10	9	8	9	10
24	1	1	1	2	3	4	10	10	10	9	9	10
25	4	4	4	5	5	4	10	9	10	10	8	9
26	6	5	8	6	5	7	8	7	7	6	6	8
27	8	4	9	8	4	3	10	10	10	9	9	9
28	2	3	2	3	4	3	10	10	10	9	6	7
29	8	3	6	4	5	3	10	8	10	10	8	10
30	4	4	3	3	4	4	10	10	8	9	9	9
31	3	4	3	4	6	2	10	9	8	10	7	10
32	8	6	2	3	2	8	10	8	10	9	10	10
$\sum_j K_{ij}^A$	133	130	116	118	139	119	311	277	294	287	255	292
\bar{K}_i^A	4,15	4,06	3,62	3,68	4,34	3,71	9,71	8,65	9,18	8,96	7,96	9,12

**А.9. Розрахунок “дидактичної якості” методики вивчення
електродинаміки традиційної (Т) і експериментальної (Е) (група А)**

Таблиця А.8

Традиційна методика вивчення електродинаміки

i	1	2	3	4	5	6
Z_1^A	30,9	21,4	15,5	14,5	10,1	7,6
$K_{i(T)}^A$	3,81	4,81	5,63	5,54	4,55	5,18
$K_{i(T)}^A Z_1^A$	117,7	102,9	87,3	80,3	46	39,4

$$D_T^A = \frac{\sum_{i=1}^n K_{i(T)}^A Z_1^A}{Z} = 4,74$$

Таблиця А.9

Експериментальна методика вивчення електродинаміки на основі ФФП

i	1	2	3	4	5	6
Z_1^A	30,9	21,4	15,5	14,5	10,1	7,6
$K_{i(E)}^A$	9,09	8,27	7,45	8,18	6,81	8,63
$K_{i(E)}^A Z_1^A$	280,1	177,0	115,5	118,6	68,8	65,6

$$D_E^A = \frac{\sum_{i=1}^n K_{i(E)}^A Z_1^A}{Z} = 8,3.$$

**А.10. Розрахунок “дидактичної якості” традиційної (Т) і
експериментальної (Е) методики вивчення електродинаміки (група В)**

Таблиця А.10

Традиційна методика вивчення електродинаміки

i	1	2	3	4	5	6
Z_1^B	32,81	18,96	19,37	14,06	7,96	6,81
$K_{i(T)}^B$	4,15	4,06	3,62	3,68	4,34	3,71
$K_{i(T)}^B Z_1^B$	136,2	77,0	70,1	51,7	34,5	25,3

$$D_T^B = \frac{\sum_{i=1}^n K_{i(T)}^B Z_1^B}{Z} = 3,95$$

Таблиця А.11

Експериментальна методика вивчення електродинаміки на основі ФФП

i	1	2	3	4	5	6
Z_1^B	32,81	18,96	19,37	14,06	7,96	6,81
$K_{i(E)}^B$	9,71	8,65	9,18	8,96	7,96	9,12
$K_{i(E)}^B Z_1^B$	318,6	164,0	177,8	126,0	60,5	62,1

$$D_E^B = \frac{\sum_{i=1}^n K_{i(E)}^B Z_1^B}{Z} = 9,09$$

**А.11. Ранги оцінок відповідності критерію традиційної (Т) і експериментальної (Е) методики вивчення
електродинаміки (група А)**

Таблиця А.12

Порядковий номер експерта (j)	$X_{ij(T)}^A$						$X_{ij(E)}^A$					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
2	2	2	1,5	2	2	2	1	1	1,5	1	1	1
3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
4	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
5	2	2	1,5	1,5	1,5	2	1	1	1,5	1,5	1,5	1
6	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
8	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
9	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
10	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
11	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
$\sum_j X_{ij}^A = X_i^A$	22,0	22,0	21,0	21,5	21,5	22,0	11,0	11,0	12,0	11,5	11,5	11,0

А.12. Ранги оцінок відповідності критерію традиційної (Т) і експериментальної (Е) методики вивчення електродинаміки (група В)

Таблиця А.13

Порядковий номер експерта (j)	$X_{ij(T)}^B$						$X_{ij(E)}^B$					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	2						3					
1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
3	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1
4	2	2	2	2	1,5	2	1	1	1	1	1,5	1
5	2	2	2	2	1,5	2	1	1	1	1	1,5	1
6	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2	1	1
8	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
9	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
10	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1
11	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
12	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
13	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
14	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
15	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
16	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
17	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1

Продовження табл. А.13

1	2						3					
18	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
19	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
20	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
21	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
22	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
23	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
24	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
25	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
26	2	2	1	1,5	2	2	1	1	2	1,5	1	1
27	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
28	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
29	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
30	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
31	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
32	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
$\sum_j X_{ij}^B = X_i^B$	64,0	64,0	63,0	62,5	61,0	64,0	33,0	32,0	33,0	33,5	35,0	32,0

А.13. Розрахунок результуючих зважених рангів структур традиційної (Т) і експериментальної (Е) методики вивчення електродинаміки (група А)

1. Вагу W_i критерію оцінювання знаходимо згідно співвідношення:

$$W_i = W_0 + \frac{Q_i - Q_0}{Q_s - Q_0} (W_s - 1),$$

де, згідно таблиці А.5 “Додатку А”, $Q_0^A = 64$, $Q_s^A = 1$ і $W_0^A = 1$; $W_s^A = 6$.

Маємо:

$$W_i^A = 1 + \frac{Q_i^A - 64}{1 - 64} (6 - 1) = 7,03 - 9,431 \theta^2 \cdot Q_i^A.$$

2. Значення рангових сум критеріїв $Q_{i\bullet}^A$, вага критеріїв W_i^A , рангові суми оцінок традиційної $X_{i\bullet(T)}^A$ і експериментальної $X_{i\bullet(E)}^A$ методик вивчення електродинаміки, зводимо в таблицю.

Таблиця А.14

i	1	2	3	4	5	6
$Q_{i\bullet}^A = \sum_j Q_{ij}^A$	11	27	34	42	53	64
$W_i^A = 7,03 - 9,431 \theta^2 \cdot Q_{i\bullet}^A$	6,00	4,45	3,8	3,05	2,00	1,00
$X_{i\bullet(T)}^A = \sum_j X_{ij(T)}^A$	22,0	22,0	21,0	21,5	21,5	22,0
$X_{i\bullet(E)}^A = \sum_j X_{ij(E)}^A$	11,0	11,0	12,0	11,5	11,5	11,0

3. Обраховуємо результуючий зважений ранг методики вивчення електродинаміки:

$$X_T^A = \sum_{i=1}^6 W_i^A \sum_{j=1}^6 X_{ij(T)}^A = 440$$

$$X_E^A = \sum_{i=1}^6 W_i^A \sum_{j=1}^6 X_{ij(E)}^A = 230$$

А.14. Розрахунок результуючих зважених рангів структур традиційної (Т) і експериментальної (Е) методики вивчення електродинаміки (група В)

1. Вагу W_i критерію оцінювання знаходимо згідно співвідношення:

$$W_i = W_0 + \frac{Q_i - Q_0}{Q_s - Q_0} (W_s - 1),$$

де, згідно таблиці А.6 “Додатку А”, $Q_0^B = 172$, $Q_s^B = 36$ і $W_0^B = 1$; $W_s^B = 6$.

Маємо:

$$W_i^B = 1 + \frac{Q_i^B - 172}{36 - 172} (6 - 1) = 7,32 - 3,681 \theta^2 \cdot Q_i^B.$$

2. Значення рангових сум критеріїв Q_i^B , вага критеріїв W_i^B , рангові суми оцінок традиційної $X_{i \cdot (T)}^B$ і експериментальної $X_{i \cdot (E)}^B$ методик вивчення електродинаміки, зводимо в таблицю.

Таблиця А.15

I	1	2	3	4	5	6
$Q_i^B = \sum_j Q_{ij}^B$	36	93	96	113	162	172
$W_i^B = 7,32 - 3,681 \theta^2 \cdot Q_i^B$	6,00	3,90	3,79	3,17	1,37	1,00
$X_{i \cdot (T)}^B = \sum_j X_{ij(T)}^B$	64,0	64,0	63,0	62,5	61,0	64,0
$X_{i \cdot (E)}^B = \sum_j X_{ij(E)}^B$	33,0	32,0	33,0	33,5	35,0	32,0

3. Обраховуємо результуючий зважений ранг методики вивчення електродинаміки:

$$X_T^B = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n W_i^B \sum_{j=1}^m X_{ij(T)}^B = 121.$$

$$X_E^B = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n W_i^B \sum_{j=1}^m X_{ij(E)}^B = 63 \epsilon$$

А.15. Абсолютні частоти L_{ij} належності членів контрольної (К) і експериментальної (Е) вибірок до категорії 1 шкали вимірювань (завдання і контрольної роботи j в цілому виконано вірно).

Розділ “і” ($j=1$).

Таблиця А.16

Номер завдання (і) Абсолютна частота (L_{i1})	1	2	3
$L_{i1(к)}$	62	35	18
$L_{i1(е)}$	74	47	34

($j=2$).

Таблиця А.17

Номер завдання (і) Абсолютна частота (L_{i2})	1	2	3
$L_{i2(к)}$	69	48	25
$L_{i2(е)}$	77	56	40

($j=3$).

Таблиця А.18

Номер завдання (і) Абсолютна частота (L_{i3})	1	2	3
$L_{i3(к)}$	78	57	27
$L_{i3(е)}$	86	69	42

($j=4$).

Таблиця А.19

Номер завдання (і) Абсолютна частота (L_{i4})	1	2	3
$L_{i4(к)}$	50	30	18
$L_{i4(е)}$	59	41	29

А.16. Абсолютні частоти N_{nm} належності членів вибірки n до категорії m шкали вимірювань в результаті виконання завдань окремих видів контрольних робіт.

1. Відтворення законів загального характеру ($i=1$)

Таблиця А.20

Категорія шкали (m) \ Вибірка (n)	1 (вірно)	2 (невірно)	$\sum_{m=1}^2 N_{nm}$
1 (контрольна)	259	141	$400=N_1$
2(експериментальна)	296	104	$400=N_2$
$\sum_{n=1}^2 N_{nm}$	555	245	$800=N$

2. Розв'язування простих задач ($i=2$)

Таблиця А.21

Категорія шкали (m) \ Вибірка (n)	1 (вірно)	2 (невірно)	$\sum_{m=1}^2 N_{nm}$
1 (контрольна)	170	230	$400=N_1$
2 (експериментальна)	213	187	$400=N_2$
$\sum_{n=1}^2 N_{nm}$	383	417	$800=N$

3. Розв'язування складних задач ($i=3$)

Таблиця А.22

Категорія шкали (m) \ Вибірка (n)	1 (вірно)	2 (невірно)	$\sum_{m=1}^2 N_{nm}$
1 (контрольна)	88	312	$400=N_1$
2 (експериментальна)	145	255	$400=N_2$
$\sum_{n=1}^2 N_{nm}$	233	567	$800=N$

**А.17. Обчислення спостережуваних значень статистики критерію $\chi^2(T)$
для завдань окремих видів контрольних робіт.**

Обчислення проводимо згідно співвідношення [80, с. 97]:

$$T = \frac{N(N_{11}N_{22} - N_{12}N_{21})^2}{N_1N_2(N_{11} + N_{21})(N_{12} + N_{22})},$$

де $N_1=N_2=400$ — кількість членів контрольної ($n=1$) і експериментальної ($n=2$) вибірок окремо; $N=N_1+N_2=800$ — сумарна кількість членів контрольної (1) і експериментальної ($n=2$) вибірок; N_{nm} — абсолютні частоти належності членів вибірки n до категорії m шкали вимірювань (табл. А.21, А.22, А.23).

1. Відтворення законів загального характеру ($i=1$, табл. А.21):

$$T_1 = \frac{80(25910429614)^2}{40040(25929)(141104)} = 8,05 > 3,84 = T_{кр}$$

2. Відтворення законів загального характеру ($i=2$, табл. А.22):

$$T_2 = \frac{80(17018721323)^2}{40040(17021)(230187)} = 9,26 > 3,84 = T_{кр}$$

3. Відтворення законів загального характеру ($i=3$, табл. А.23):

$$T_3 = \frac{80(8825514531)^2}{40040(8814)(31225)} = 1,97 > 3,84 = T_{кр}$$

А.18. Успішність експериментального навчання учнів 10 - 11 класів фізико-математичного профілю Тернопільського педагогічного ліцею під час вивчення курсу «Електродинаміка» (по розділах).

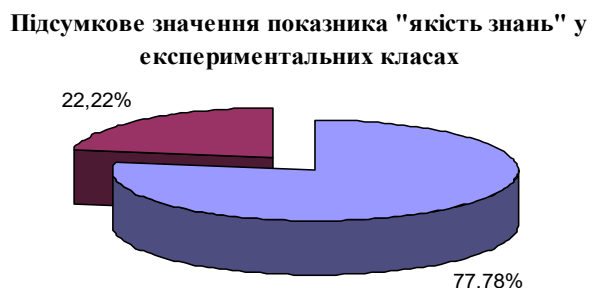
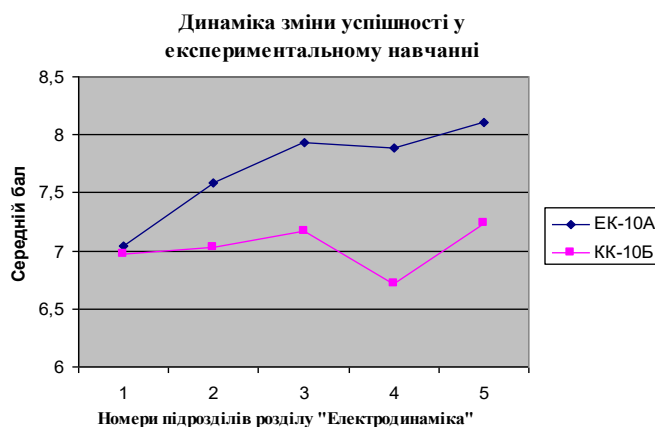
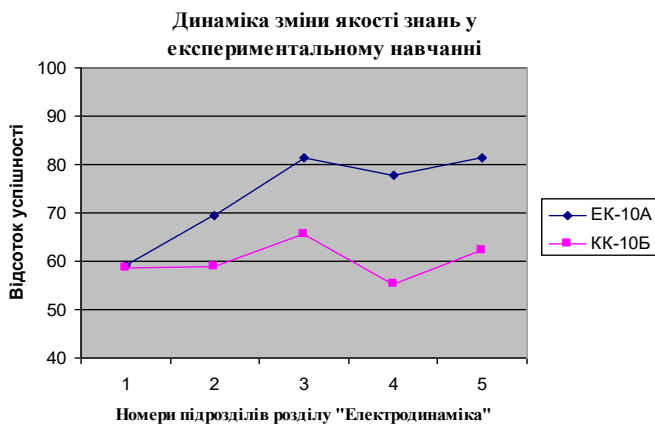
Таблиця А.23

Динаміка успішності експериментального навчання

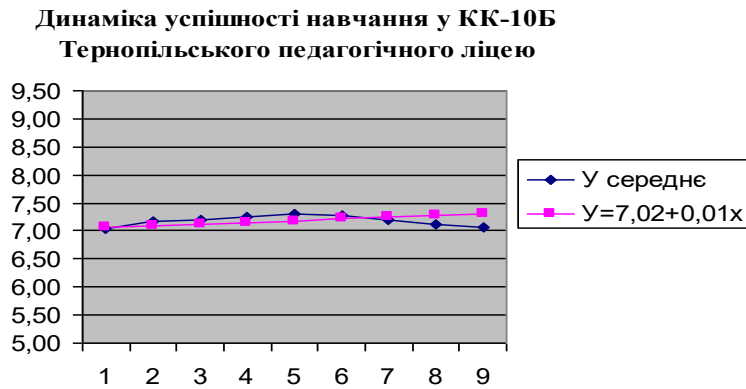
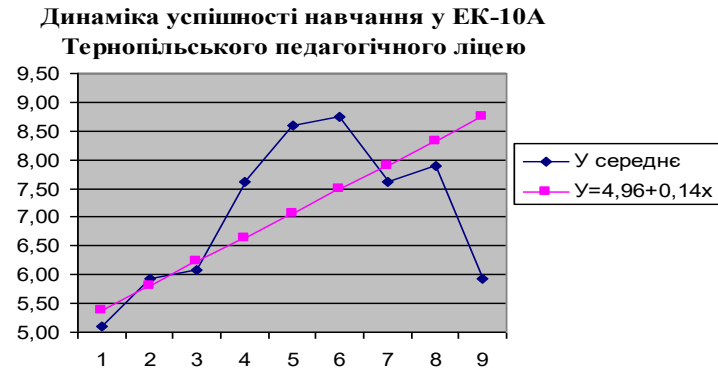
Класи	Кількість оцінок												Сер. бал	Якість зн.(%)	
	Оцінки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			12
10А, (27 уч.)	Розд.1			1	2	3	5	5	5	2	3	1		7,04	59,25
	Розд.2				2	2	4	5	5	4	3	2		7,59	70,37
	Розд.3				1	1	3	6	6	4	5	1		7,93	81,48
	Розд.4				1	1	4	5	6	4	5	1		7,89	77,78
	Розд.5				1	1	3	5	5	5	5	2		8,11	81,48

Таблиця А.24

Класи	Кількість оцінок												Сер. бал	Якість зн.(%)	
	Оцінки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			12
10Б, (29 уч.)	Розд.1			1	2	3	6	7	4	2	3	1		6,97	58,62
	Розд.2				3	4	5	5	5	4	2	1		7,03	58,62
	Розд.3				3	2	5	7	5	4	2	1		7,17	65,52
	Розд.4				4	6	3	6	4	4	1	1		6,72	55,17
	Розд.5				3	3	5	5	6	4	2	1		7,14	62,07



**А.19. Перевірка гіпотези про наявність лінійного кореляційного зв'язку.
Побудова лінії регресії успішності експериментального навчання учнів 10 -
11 класів фізико-математичного профілю Тернопільського педагогічного
ліцею під час вивчення курсу «Електродинаміка».**



Таблиця А.25

Динаміка успішності навчання учнів 10-11-х класів (по розділах курсу
«Електродинаміка»)

Тип класів	Назви шкіл	К-ть учн.	Номери зрізів					Рівняння регресії	Сер. бал	«5» «4» (%)
			1	2	3	4	5			
ЕГ	Терноп. пед. ліц.	112	7,05	7,78	7,91	7,88	8,15	$y=5,02+0,14x$	7,75	77,8
КГ	Терноп. пед. ліц.	115	7,02	7,04	7,22	7,12	7,15	$y=7,02+0,01x$	7,11	60,1
ЕГ	СШ № 11 м. Терноп.	140	7,04	7,62	7,80	7,90	8,06	$y=4,98+0,12x$	7,70	72,2
КГ	СШ № 11 м. Терноп.	149	7,00	7,24	7,00	7,14	7,16	$y=6,95+0,01x$	7,10	56,9
ЕГ	СШ № 27 м. Терноп.	120	7,08	7,54	7,78	7,92	8,08	$y=5,04+0,11x$	7,67	70,3
КГ	СШ № 27 м. Терноп.	128	7,03	7,16	7,02	7,04	7,12	$y=6,89+0,01x$	7,08	52,7

А.20. Зразки задач (III рівня), що використовувались для перевірки успішності експериментального навчання учнів 10 - 11 класів фізико - математичного профілю Тернопільського педагогічного ліцею під час вивчення курсу «Електродинаміка».

1) Чотири однакових заряди q розміщені у вершинах квадрата. Який заряд Q протилежного знаку треба помістити в центрі квадрата, щоб система залишилась в рівновазі?

2) У вершинах куба розміщені однакові заряди $+q$. Який заряд треба помістити в центрі куба, щоб вся система знаходилась в рівновазі?

3) Чотири однакових заряди розміщені вершинах тетраедра з ребром a . Яку силу i в якому напрямку треба прикласти до кожного заряду, щоб цю систему утримати в рівновазі?

4) Маленька кулька з зарядом q знаходиться на віддалі a від необмеженої плоскої металевої поверхні. З якою силою взаємодіють кулька і поверхня?

5) На кільці з тонкої дротини рівномірно розподілено заряд $+q$. Радіус кільця R . Визначити напруженість поля: а) в центрі кільця; б) в точках, віддалених від всіх елементів кільця на відстань r .

6) Куля радіуса R рівномірно заряджена по поверхні зарядом q . Визначити напруженість електричного поля в точках, віддалених від центра кулі на відстань r .

7) З дроту постійного перерізу виготовляється каркас у вигляді тетраедра, опір кожного ребра якого рівний r . Знайти опір тетраедра, якщо напругу підведено до одного з його ребер.

8) Знайти опір між сусідніми вершинами провідного куба, опір кожного із ребер якого дорівнює l Ом.

9) Знайти опір між вершинами куба, розміщеними на діагоналі однієї із його граней. Опір кожного із ребер l Ом.

10) Чотири однакові за модулем точкові заряди $q = 2$ Кл кожен, розміщені у вершинах квадрата зі стороною 2 м. Знайти модулі і напрямки

напруженості електричного поля системи зарядів у центрі квадрата та на серединах його сторін в чотирьох випадках: 1) всі заряди позитивні; 2) заряди А і Б позитивні, В і Г негативні; 3) заряди Б і В позитивні, А і Г негативні; 4) заряди Б і Г позитивні, А і В негативні.

11) У вершинах гострих кутів прямокутного трикутника розташовані однакові за модулем різнойменні заряди $q = 2 \text{ Кл}$. Визначити напруженість E і потенціал φ в вершині прямого кута. Катети трикутника дорівнюють 3 см і 4 см.

12) Діагоналі ромба мають довжину $d_1 = 2 \text{ см}$ і $d_2 = 3 \text{ см}$. На кінцях короткої діагоналі розташовані заряди $q_1 = 2 \text{ мкКл}$ і $q_2 = 6 \text{ мкКл}$, на кінцях довгої – заряди $q_3 = 3 \text{ мкКл}$ і $q_4 = 12 \text{ мкКл}$. Знайти модуль і напрямок напруги E електричного поля в центрі ромба.

13) У вершинах рівностороннього трикутника зі стороною $a = 5 \text{ м}$ розташовані три однакові заряди $q = 3 \text{ мкКл}$ кожний. Визначити модуль і напрямок напруги E електричного поля в центрі трикутника і вершині тетраедра, побудованого на цьому трикутнику.

14) Два точкових заряди $q_1 = 9 \text{ мкКл}$ і $q_2 = 25 \text{ мкКл}$, розташованих на відстані $l = 20 \text{ см}$ один від одного. Знайти, в якій точці на прямій, що їх з'єднує, напруга поля дорівнює нулю.

15) Металева куля радіусом $R_1 = 4 \text{ см}$ заряджена до потенціалу $\varphi = 2 \text{ В}$. Визначити напругу і потенціал електричного поля на відстані $l_1 = 2 \text{ см}$ і $l_2 = 6 \text{ см}$. Розглянути два випадки: 1) куля знаходиться у повітрі; 2) куля знаходиться в діелектрику з діелектричною проникністю $\varepsilon = 2$.

16) Металева куля радіусом $R_1 = 2 \text{ см}$ заряджена зарядом $q_1 = 2 \text{ мкКл}$. Куля оточена концентричною металевою оболонкою радіусом $R_2 = 6 \text{ см}$, заряд якої $q_2 = -6 \text{ мкКл}$. Знайти напругу і потенціал поля на наступних відстанях від центра кулі: $l_1 = 1 \text{ см}$; $l_2 = 4 \text{ см}$; $l_3 = 8 \text{ см}$.

17) Металева куля радіусом $R_1 = 2 \text{ см}$, заряджена до потенціалу $\varphi_0 = 2 \text{ В}$, оточена сферичною концентрично оболонкою радіусом $R_2 = 4 \text{ см}$. Чому дорівнюватиме потенціал φ кулі, якщо оболонку заземлити?

18) Дві металеві кулі радіусом $R_1 = 2 \text{ см}$ і $R_2 = 4 \text{ см}$ заряджені однакоvim за модулем і знаком зарядом $q_1 = q_2 = 2 \text{ мкКл}$. Кулі з'єднуються довгим провідником. Знайти ΔQ – кількість електроенергії, яке пройде при цьому по провіднику.

19) Дано каркас із однорідного дроту в формі куба. До протилежних кінців діагоналі куба підводиться постійна напруга, у ребрах куба течуть струми. Чому дорівнює напруженість магнітного поля в центрі куба?

20) До двох довільних точок A і B дроту, що має форму кола, прикладено постійну різницю потенціалів, внаслідок чого по цих дугах протікають струми. Чому дорівнює напруженість магнітного поля в центрі кола?

21) Дві металеві концентричні сфери мають радіуси R_1 і R_2 . На внутрішній сфері знаходиться заряд q_1 , а на зовнішній q_2 . Знайти напруженість і потенціал поля ззовні сфер, а також всередині малої і великої сфер.

22) На поверхні двох концентричних провідних сфер з радіусами 5 і 10 см рівномірно (з однаковою густиною) розподілений деякий заряд. Знайти заряд q , якщо для переносу позитивного одиничного заряду із нескінченності в центр сфер потрібно здійснити роботу 3 кДж .

23) Електрон влітає в плоский конденсатор паралельно до його пластин на відстані $d = 4 \text{ см}$ від позитивно зарядженої пластини; довжина пластини $l = 15 \text{ см}$. Через який час t електрон впаде на цю пластину, якщо напруга поля конденсатора рівна $E = 500 \text{ В/м}$? З якою мінімальною швидкістю V_0 повинен влетіти електрон, щоб не впасти на пластину? Маса електрона $m_0 = 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

24) Електрон влітає в плоский конденсатор паралельно до його пластин із швидкістю $V_0 = 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. Знайти напругу E поля конденсатора, якщо електрон влітає під кутом $\alpha = 30^\circ$ до пластин. Довжина пластини $l = 20 \text{ см}$. Маса і заряд електрона відомі.

25) Всередині плоского конденсатора з напругою електричного поля E , рівномірно обертається кулька масою m із зарядом $+q$, підвішена на нитці

довжиною l . Кут відхилення нитки від вертикалі рівний α . Знайти силу натягу нитки T і кінетичну енергію W_k кульки.

26) Всередині сфери радіусом R , заряд якої дорівнює q , знаходиться заземлена провідна сфера радіусом r . Центри сфер співпадають. Знайти напруженість електричного поля зовні великої сфери на відстані l від її центру.

27) Дві частинки масою m_1 і m_2 , різнойменно заряджені, рухаються під впливом взаємного електричного притягання по колу навколо нерухомого центру мас. Швидкість частинки маси m_1 миттєво збільшують в n раз, не змінюючи її напрямку. При якому мінімальному значенні n частинки розлетяться нескінченно далеко одна від одної? Заряди частинок рівні за модулем

28) В прискорювачі по колу радіусом r в магнітному полі, перпендикулярному площині траєкторії, рухається тонкий пучок протонів. Знайти силу струму після того, як частинки зробили один оберт. Сила струму пучка в початковий момент дорівнює I_0 , кількість протонів у камері дорівнює n . Потік індукції магнітного поля через орбіту протонного пучка змінюється з постійною швидкістю ($\Delta\Phi/\Delta t = \varepsilon$) так, що протони прискорюються. Маса і заряд протонів дорівнюють m і e , їх швидкість набагато менша від швидкості світла.

29) Невелике заряджене тіло маси m прикріплене до нитки довжиною l , може рухатися по колу в вертикальній площині. Однорідне магнітне поле індукції B перпендикулярне до цієї площини і направлене на спостерігача. При якій найменшій швидкості тіла в нижній точці воно зможе здійснювати повний оберт? Заряд тіла позитивний і дорівнює q .

30) Електрон, що має кінетичну енергію 10 keV , влітає в плоский конденсатор, між пластинами якого підтримується постійна різниця потенціалів 40 V . Відстань між пластинами 1 см , їх довжина 10 см . На відстані 20 см від конденсатора знаходиться екран. Початкова швидкість електрона направлена паралельно до пластин. Знайти зміщення x електрона на екрані. Як

зміниться відповідь якщо замість електрона взяти протон такої ж енергії.

Силою тяжіння знехтувати

31) Електрон влітає у точці A в однорідне магнітне поле, маючи швидкість v , яка складає з напрямком індукції магнітного поля кут α . При якій індукції магнітного поля електрон буде у точці C , яка розташована у напрямку ліній індукції магнітного поля за точкою A . Заряд електрона дорівнює e , його маса m , відстань $AC = l$.

32) При включенні магнітного поля, лінії індукції якого перпендикулярні площині витка радіуса R , у витку пройшов заряд q . Який заряд пройде у витку, якщо його (при незмінному полі скласти “вісімкою”, яка складається із двох кіл, причому радіус меншого кола дорівнює $R/4$). Площина “вісімки” перпендикулярна до ліній індукції магнітного поля.

33) Виток дроту, що має площу 10 см^2 , розрізали в деякій точці і в розріз включили конденсатор ємністю 10 мкФ . Виток поміщено в однорідне магнітне поле, лінії індукції якого перпендикулярні площині витка. Індукція магнітного поля рівномірно змінюється з часом і швидкістю $\Delta B/\Delta t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Тл/с}$. Визначити заряд конденсатора.

34) Заряджений конденсатор ємності C через ключ K підключили до двох паралельно з'єднаних котушок індуктивностями L_1 та L_2 . В початковий момент часу ключ розімкнений. Якщо замкнути ключ K , то через котушки потечуть струми. Максимальний струм який протікає через котушку L_1 , дорівнює I_1 . Знайти початковий заряд на конденсаторі. Опором котушок знехтувати.

35) Котушки 1 і 2 однакової індуктивності L підключені через ключі K_1 і K_2 до конденсатора ємністю C . В початковий момент часу обидва ключі роз'єднані, а конденсатор заряджений до різниці потенціалів V_0 . Спершу замикають ключ K_1 і тоді, коли напруга на конденсаторі стане рівною нулю, замикають ключ K_2 . Знайти максимальну напругу на конденсаторі після замикання ключа K_2 . Опором котушок знехтувати.