

ТЕОРЕТИЧНІ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ВВЕДЕННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПІДГОТОВЦІ МАЙБУТНІХ УЧИТЕЛІВ ФІЗИКИ

Представлений комплексний підхід щодо застосування теоретичних і експериментальних методів введення силових характеристик електромагнітного поля при підготовці майбутніх учителів фізики в педагогічному університеті.

Ключові слова: *електродинаміка, напруженість електричного поля, індукція магнітного поля, теоретичні і експериментальні методи фізики, навчальний фізичний експеримент.*

Постановка проблеми. З фундаментальними експериментальними і теоретичними методами фізики як науки в педагогічному університеті майбутні вчителі фізики знайомляться поетапно. Спочатку вивчається курс загальної фізики, що утворює феноменологічний фундамент для подальшого розуміння фізичних теорій у курсі теоретичної фізики, але різняться вони між собою як за методами, так і за характером отриманих результатів. При підготовці майбутніх учителів фізики необхідно забезпечити наступність та міждисциплінарну інтеграцію цих курсів, а також розв'язати проблему адаптації фізичних знань загальноосвітньої та вищої школи. Такий підхід вимагає удосконалення та реформування методів навчання, змісту і структури подання навчального матеріалу, удосконалення форм і методів організації самостійної роботи.

Аналіз досліджень споріднених проблем. Якщо розглянути теоретичні та експериментальні методи введення силових характеристик електромагнітного поля в загальноосвітній школі, то цей вид матерії, на початку його вивчення, розділяють на електричне і магнітне поле та розглядають окремо. Для силових характеристик електричного поля, його напруженості \vec{E} , виявляється можливим лише теоретичне її представлення, що ґрунтується на експериментальному досліді Кулона. Щодо введення поняття індукції магнітного поля \vec{B} , як силових його характеристик, то найбільш адаптованим до шкільних умов виявляється метод, що ґрунтується на використанні закону Ампера $F_A = BIl \sin \alpha$, з яким учні знайомляться на уроці фізики при вивченні теми "Індукція магнітного поля. Потік магнітної індукції" [4]. Такий вибір є умотивованим, оскільки його найпростіше реалізувати експериментально. Навчальною програмою з фізики для 11 класу передбачено виконання лабораторної роботи "Вимірювання індукції магнітного поля постійного магніту" у лабораторному фізичному практикумі [1]. Методичною літературою пропонується чимало варіантів реалізації цієї роботи, наприклад, для самостійної підготовки учнів до її виконання розроблений й віртуальний варіант у програмному педагогічному засобі "Віртуальна фізична лабораторія. Фізика 10-11" [2]. Основним недоліком експериментальної реалізації цієї роботи є досить низька точність вимірювання сили Ампера у випадку використання лабораторних терезів, які до початку експерименту зрівноважують U-подібний магніт [3, с. 121-122]. У методичній літературі пропонують й інші варіанти використання лабораторного обладнання, що є технічно більш досконалим. Так, Ткаченко О.К. і Федьовичем М.В. пропонується використання технічних терезів у подібному дослідженні [5]. Але найважливішим, на нашу думку, є варіант, реалізований ними в останніх доробках, коли замість технічних терезів вони використали електронні [6]. Таке нововведення дозволило розширити можливості виконання експериментальних завдань: продемонструвати залежність сили Ампера від сили струму I та магнітної індукції B ; залежність сили Ампера від довжини провідника l та кута α між вектором магнітної індукції та напрямом струму в провіднику.

Методологія фізики як науки при введенні силових характеристик електромагнітного поля при підготовці майбутніх учителів фізики має бути презентованою в повному обсязі і не обмежуватись лише частинними випадками, розглянутими в шкільному курсі фізики.

Мета статті полягає в комплексному представленні теоретичних і експериментальних методів дослідження властивостей електромагнітного поля щодо розв'язання проблеми апроксимації цих методів на методи навчання при введенні силових характеристик електромагнітного поля під час підготовки майбутніх учителів фізики в педагогічному університеті.

Виклад основного матеріалу. У фізиці метод, який дає змогу одержати нові знання за допомогою проведення експерименту, називають експериментальним. Цей метод – один із основних способів отримання наукових знань. Проте важливо мати на увазі, що досліди, які демонструють на лекціях у ВНЗ або на уроках фізики в школі та виконуються в лабораторному фізичному практикумі – це навчальні досліди, і вони відрізняються від тих, які проводяться в наукових лабораторіях. Науковому експерименту передують обґрунтована гіпотеза. Вона визначає мету і зміст експерименту. Вимірювання проводяться в строго визначених умовах, дані вимірювань точно обробляються. Експеримент завершується оцінкою похибки отриманого результату. У науковому експерименті вчені ставлять природні запитання, відповідь на які наперед невідомі. Для одержання надійних висновків дослід зазвичай повторюють багаторазово, що зумовлює довготривалість наукового експерименту і часто є багаторічним.

Природні явища взаємопов'язані між собою й обумовлюють своє співіснування. Не виключенням є й електромагнітне поле як вид матерії, що для її макроскопічної області простору є об'єктом дослідження класичної електродинаміки. У фізиці цей об'єкт досліджується традиційно, за допомогою двох наукових методів пізнання – експериментального й теоретичного. Методологія класичної електродинаміки

сформувала її як феноменологічну теорію, в основу якої покладений емпіричний базис та відповідний понятійний апарат. Ядро класичної електродинаміки складає система диференціальних рівнянь Максвелла, що являє собою теоретичне узагальнення експериментальних фактів з виявлених властивостей електромагнітного поля і теоретичного передбачення нових. Визначальною особливістю класичної електродинаміки як феноменологічної теорії в порівнянні з іншими (класичною механікою, термодинамікою) є те, що її теоретичні методи дослідження ґрунтуються не лише на систематизації і узагальненні експериментальних даних про властивості електромагнітного поля та його математичному моделюванні у вигляді векторних електричного й магнітного полів, а також у можливості зробити наступний крок у процесі наукового пізнання – формулювання гіпотези (про струм зміщення). Зрозуміло, що остання потребувала експериментального підтвердження в конкретних умовах для перевірки справедливості запропонованої англійським фізиком Дж. Максвеллом "Динамічної теорії електромагнітного поля" (1864). Уперше у фізиці як науці теоретичні методи наукового пізнання природи почали передувати експериментальним. Нині можливість передбачення нових фактів є однією з основних вимог, що ставляться перед сучасними фундаментальними фізичними теоріями. Сучасна математика з її розвинутими методами та математичним апаратом є потужним засобом науково-технічного прогресу.

Теоретичний метод введення силових характеристик електромагнітного поля ґрунтується на використанні елементів математичної теорії поля в класичній електродинаміці. У фізиці електромагнітне поле як об'єкт, що вивчає електродинаміка є видом матерії, що має особливі властивості і є системою, що складається з електричного і магнітного полів, нерозривно пов'язаних між собою.

У сучасній фізиці поділ на електричне і магнітне поле до певної міри умовний, бо залежить від обраної системи відліку та характеру поведінки джерел поля. Джерелами поля є заряди як нерухомі так і рухомі, нерухомі є джерелом електричного поля, а ті, що рухаються – магнітного. Але разом з тим слід зауважувати, що маючи справу з деякими джерелами поля, й нерухомі в механічному розумінні заряди можуть створювати магнітне поле, наприклад, якщо вони мають спінові магнітні моменти. До того ж, електромагнітне поле може існувати і самостійно, без урахування його джерел.

Враховуючи експериментальні властивості електричного заряду, їх можна узагальнити в математичній моделі скалярного поля $q(\vec{r}, t)$, яке є інваріантним у будь-якій системі відліку. Разом з тим, електричний заряд має двоїсту кількісну міру прояву своїх властивостей у експериментальних дослідженнях. З одного боку він визначає силу, що діє на нього з боку поля, а з іншого він визначає інтенсивність електромагнітного поля, яке сам створює. Тому для кількісного опису електромагнітного поля вводять як силові, так і енергетичні його характеристики.

Якщо заряд не рухається $q(\vec{r}(t)) = const$, тоді пробний додатній одиничний заряд q_0 , буде зазнавати з боку поля нерухомого заряду q впливу сили $\vec{F}(q_0, q, \vec{r})$. Тоді векторна величина $\vec{F}(q_0, q, \vec{r})/q_0$ не буде залежати від пробного заряду q_0 , визначатиметься лише джерелом поля q і положенням $q_0(\vec{r})$ в ньому:

$$\vec{E}(q, \vec{r}) = \frac{\vec{F}(q_0, q, \vec{r})}{q_0}$$

Векторне поле $\vec{E}(q, \vec{r})$ – напруженість електростатичного поля, що і є його силовою характеристикою; джерелом такого поля є статичний заряд q .

Моделюючи електричне поле у вигляді векторної функції $\vec{E}(q, \vec{r})$, яка явно не залежить від часу, акцентуємо увагу студентів на тому, що вона визначає таке математичне поле як стаціонарне, якщо ж її параметр \vec{r} явно не залежить від часу, то як статичне.

Одним із фундаментальних емпіричних законів, що покладений в основу електростатики є закон Кулона (1786-1789). Він був установлений експериментально французьким фізиком і інженером Шарлем

Кулоном: $\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$, де k – коефіцієнт пропорційності пов'язаний із вибором одиниць вимірювання величин, що входять до встановленої закономірності, і визначає силу взаємодії двох точкових зарядів q_1 і q_2 , що розміщені у вакуумі на відстані \vec{r} один відносно одного. Отже, виявляється можливим математично описати електростатичне поле кожного із взаємодіючих зарядів за допомогою його силових характеристики, напруженостей електростатичного поля кожного з них: $\vec{E}_1 = k \frac{q_1}{r^3} \vec{r}$ і $\vec{E}_2 = k \frac{q_2}{r^3} \vec{r}$.

За такого підходу комплексного представлення майбутнім учителям фізики теоретичного й експериментального методів введення силової характеристики електростатичного поля варто зауважити на відмінності двох існуючих концепцій взаємодії макроскопічних об'єктів у класичних теоріях – механіці та електродинаміці. У класичній механіці взаємодія між матеріальними точками розуміється як дальнодія: система складається лише з тіл, які згідно класичної моделі є тільки матеріальними точками, дія цих тіл одне на інше здійснюється на відстані та передається миттєво. У класичній електродинаміці застосовується польова модель матерії та взаємодії: у систему входять тіла та неперервне поле, яке є переносником взаємодії між тілами і така взаємодія розуміється як близькодія.

Слід відзначити, що за часів фундаментальних досліджень Кулона почали змінюватись методи експериментальної фізики, для експериментальних досліджень вчені почали широко використовувати

спеціально виготовлені вимірювальні прилади, які мали високу точність. Кулоном були розроблені спеціальні крутильні терези, і справедливість його закону було перевірено з точністю для відстаней $[10^{-3}; 10^{-1}]$ м. Нині експериментальна фізика стала технічно досконалішою і експериментальні прилади мають не лише високу точність вимірювання але й швидкодію, високу чутливість і здатність працювати дистанційно. Велику цікавість має питання про межі застосування закону Кулона. Для географічних і космічних відстаней перевірка закону Кулона ґрунтується на посередніх методах вимірювання, в основу яких покладені квантово-механічні уявлення про взаємодію заряджених частинок з урахуванням їх хвильових властивостей. За допомогою супутників у просторі біля поверхні Землі вдалося перевірити закон Кулона з великою точністю для $r \approx 10^7$ м. Для малих відстаней закон Кулона перевірявся за взаємодією елементарних частинок. Досліди Резерфорда переконують це для $r \approx 10^{-14}$ м.

Досліджуючи силову характеристику електричного поля, його математичну модель ускладнюють, враховуючи явно функціональну залежність його змінних $q_0 = q(\vec{r}(t))$ і $\vec{r}(t)$ від часу. Якщо в досліджуваній системі відліку, пробний заряд $q_0 = q(\vec{r}(t))$ має швидкість $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$, але й тоді $\vec{E}(q, \vec{r})$, що характеризує джерело поля, означатиметься подібно до статичного випадку, оскільки q_0 не є залежним параметром для функції $\vec{E}(q, \vec{r})$. Але якщо джерело електричного поля $q(\vec{r}(t))$ буде рухатися, тоді поле $\vec{E}(q(\vec{r}(t)), \vec{r}(t))$ не буде вже статичним і разом з ним у такій системі відліку буде виявляти себе й магнітне поле, силовою характеристикою якого є його індукція $\vec{B}(\vec{r})$. Разом з тим, якщо перейти до системи відліку, яка рухається із швидкістю такою ж, що і заряд, то в такій системі існуватиме лише електричне поле, тому що відносно неї заряд перебуватиме в спокої. Якщо ж джерело електричного й магнітного полів матиме змінну в часі швидкість свого руху $\vec{v} = \vec{v}(t)$, тоді і електричне і магнітне поле виявляються явно функціонально залежними від часу $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$, $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t)$ та існуватимуть одночасно. Досліджуючи диференціальні властивості таких математичних полів, Максвелл гіпотетично припустив, що навіть без урахування джерел електромагнітного поля воно має існувати як окремий вид матерії. Згодом, у експериментальних дослідженнях німецького фізика Генріха Герца цей прояв був виявлений у вигляді електромагнітних хвиль.

Експериментальну установку і самі досліди Герц описав в опублікованій ним у 1887 році статті "Про дуже швидкі електричні коливання". У багатьох наступних роботах Герц незаперечно довів існування електромагнітних хвиль, що розповсюджуються з кінцевою швидкістю і спростовує концепцію дальності для області електромагнітних явищ, підсумовуючи свої дослідження він зазначав: "Всі ці досліди дуже прості в принципі, але, тим не менш, вони тягнуть за собою найважливіші наслідки. Вони руйнують будь-яку теорію, яка вважає, що електричні сили перестрибують простір миттєво. Вони означають блискучу перемогу теорії Максвелла... Наскільки мало ймовірним здавалося раніше її погляд на сутність світла, настільки важко тепер не розділити цей погляд" [7].

Залишається відкритим питання щодо введення силової характеристики магнітного поля і тут існує декілька підходів, одним з фундаментальних у теоретичній фізиці – відшукання інваріантних величин щодо опису стану фізичних систем у будь-якій інерціальній системі відліку. Оскільки експерименти вказують на те, що виявлення електричного, магнітного або електромагнітного поля залежить від вибору системи відліку, в якій проводяться вимірювання, то окремо кожна з силових характеристик поля не є інваріантною величиною. Але такий інваріант можна підібрати, виявляючи силу з боку електромагнітного поля у тій системі відліку, в якій поле проявляє обидві свої складові – електричну і магнітну. Знову ж таки, математична модель такого поля має бути максимально спрощеною щодо уможливлення її канонічного математичного представлення. Отже, у такому випадку доцільно розглядати саме статичний прояв обох типів полів. У статичному полі як на нерухомий, так і на рухомий пробний заряд q_0 електричне поле буде проявляти себе як сила $\vec{F}_e = q_0 \vec{E}(q, \vec{r})$, магнітостатичне поле виявлятиме свій вплив лише на рухомий пробний заряд як $\vec{F}_m = q_0 [\vec{v}, \vec{B}(\vec{r})]$, де \vec{v} – швидкість руху заряду q_0 . Суперпозиція обох силових складових утворює інваріант, який називають силою Лоренца $\vec{F}_n = \vec{F}_e + \vec{F}_m$, підкреслюючи той факт, що знайдене силове поле є інваріантним й до перетворень Лоренца у квазірелятивістській області простору, коли. Застосовуючи такий теоретичний підхід, нам вдалося показати взаємозв'язок електричного і магнітного полів та зумовити пошуки причини їх виникнення, закономірності розвитку.

Отже, встановити силову характеристику магнітного поля можна, якщо у магнітостатичне поле помістити пробний заряд, що рухається з невеликою швидкістю, тоді з боку поля заряд зазнаватиме впливу магнітної складової сили Лоренца $\vec{F}_m = q_0 [\vec{v}, \vec{B}(\vec{r})]$. Ця формула підтверджується експериментальною фізикою і має назву закону Лоренца. Векторна форма цього рівняння, при введенні силової характеристики магнітного поля $\vec{B}(\vec{r})$, потребує врахування математичного правила векторного добутку між вимірюваними параметрами рівняння. Сила \vec{F}_m завжди перпендикулярна векторам співмножникам \vec{v} і $\vec{B}(\vec{r})$, у той час як

останні можуть бути зорієнтованими як завгодно. Максимальною сила буде в тому випадку, коли кут між \vec{V} і $\vec{B}(\vec{r})$ буде рівним $\frac{\pi}{2}$. Якщо обрати умови експерименту такі, що $q_0 = 1 Кл$, тоді $|\vec{B}| = |\vec{F}_m|$.

У запропонованому теоретичному підході введення силової характеристики магнітностатичного поля $\vec{B}(\vec{r})$ нас не цікавили його джерела, важливим був лише його вплив на рухомий заряд. Таким чином, нам вдалося побудувати математичну модель поля, досліджуючи яку, можна встановити й інші властивості магнітного поля, узгодивши їх з експериментом. Але такий підхід не може бути застосовним у шкільному курсі фізики оскільки учні не мають необхідних математичних знань.

Разом з тим існують й інші способи введення силової характеристики магнітного поля: за значенням сили, що діє на елемент струму; за моментом діючої сили на малу рамку зі струмом у магнітному полі. Ці способи найлегше здійснюються експериментально. Ця обставина віддає їм перевагу у навчальних курсах загальної фізики та методики навчання фізики.

Висновки і перспективи подальшого розвитку. Комплексне представлення теоретичних і експериментальних методів дослідження властивостей електромагнітного поля уможливило розв'язання проблеми апроксимації цих методів на методи введення силових характеристик цього поля в навчальних курсах фізики педагогічного університету, а також розв'язати проблему адаптації цих методів навчання до загальноосвітньої школи, що є перспективною проблемою щодо удосконалення і розвитку системи навчального фізичного експерименту.

Використані джерела

1. Навчальні програми для 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів [Електронний ресурс]: Програма для середніх навчальних закладів. Фізика. 10-11 класи. Профільний рівень // Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України. Офіційний веб-сайт. – Режим доступу до програми: http://www.mon.gov.ua/ua/activity/education/56/general-secondary-education/educational_programs/1352202396.
2. Педагогічно-програмний засіб "Віртуальна фізична лабораторія. Фізика 10-11" для загальноосвітніх навчальних закладів [Електронний ресурс]: ППЗ "Віртуальна фізична лабораторія. Фізика 10-11" для загальноосвітніх навчальних закладів // Всеукраїнський освітній портал "Острів знань". – Режим доступу до програми: <http://shkola.ostriv.in.ua/publication/code-39182099994C5/list-211469C1327>.
3. Практикум по физике в средней школе: Дидакт. материал: Пособие для учителя / [Л.И. Анциферов, В.А. Буров, Ю.И. Дик и др.]; под ред. В.А. Букова, Ю.И. Дика. – [3-е изд.]. – М.: Просвещение, 1987. – 191 с.
4. Сиротюк В.Д. Фізика: підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (рівень стандарту) / В.Д. Сиротюк, В.І. Баштовий. – Харків: Сиція, 2011. – С. 66-67.
5. Ткаченко О.К. Практикум із шкільного фізичного експерименту. Частина II: [навч. посіб.] / Ткаченко О.К., Федьович М.В. – Житомир: Поліграфічний центр ЖДУ. – 2004. – С.71-73.
6. Ткаченко О.К. Фізичний експеримент при введенні сили Ампера / О.К. Ткаченко, М.В. Федьович, Б.В. Свищ // Актуальні проблеми методології та методики навчання фізико-математичних дисциплін: міжнар. наук. конф., 18-19 січ. 2013 р.: матеріали конф. – К., 2013. – С. 29-30.
7. Шнейберг Я. Создатель первого генератора и приемника электромагнитных волн. К 150-летию со дня рождения Г. Герца / Я. Шнейберг // Connect! Мир связи. – 2006. – №7. – С. 132-135.

Podoprygora N.V.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL METHODS OF INTRODUCTION OF POWER DESCRIPTIONS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD ARE AT PREPARATION OF FUTURE TEACHERS OF PHYSICS

Complex approach is presented in relation to application of theoretical and experimental methods of introduction of power descriptions of the electromagnetic field in preparing future teachers of physics in a pedagogical university.

Key words: *electrodynamics, tension of the electric field, induction of the magnetic field, theoretical and experimental methods of physics, educational physical experiment.*

Стаття рекомендована кафедрою фізики та методики її викладання Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка

Стаття надійшла до редакції 15.03.2013