

## ЕЛЕМЕНТАРНА ТЕОРІЯ НАМАГНІЧЕННЯ ДІАМАГНЕТИКІВ У СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ВЧИТЕЛЯ ФІЗИКИ

*Аналізується стан викладання деяких питань електродинаміки суцільних середовищ. Розглядається методика подання у навчальному процесі підготовки вчителя фізики механізму впливу діамагнетиків на зовнішнє магнітне поле. Пропонується оригінальний спосіб оцінки додаткового магнітного моменту, який виникає внаслідок прецесії електронів в атомах у зовнішньому магнітному полі.*

**Ключові слова:** *магнітний момент, теорема Лармора, швидкість прецесії, вектор намагнічення.*

**Постановка проблеми.** Теорія магнітних явищ, побудова теорії магнітного поля та аналіз причин впливу речовини на зовнішнє магнітне поле – це той мінімум знань, яким повинні оволодіти майбутні вчителі, щоб вони у своїй подальшій роботі у якості вчителя на належному рівні викладали не лише відповідні питання фізики, але й з успіхом розглядати важливі прикладні питання (принцип роботи електродвигунів, генераторів, трансформаторів тощо). Тому зазначені питання в системі підготовки вчительських кадрів з фізики повинні мати достатньо повне і сучасне науково-методичне обґрунтування.

**Аналіз актуальних досліджень** показує, що над розробкою і висвітленням методики навчання електродинаміки працюють багато провідних науковців-методистів з фізики. Високо оцінюючи дослідження вітчизняних авторів у визначенні ролі та місця електродинаміки в системі підготовки вчителів фізики і в розбудові методики її подання у навчальному процесі, зазначимо, що їх розробки здебільшого присвячені методиці навчання загальної фізики та шкільного курсу фізики [1-5]. Методика навчання електромагнітних явищ у курсі теоретичної фізики в педагогічних університетах довгий час залишалась поза увагою методичної науки. Відомі праці О.А. Коновала [6] з методики навчання електромагнітизму на основі спеціальної теорії відносності у вищих навчальних закладах не вирішили всіх питань, оскільки в них розроблена сучасна методика вивчення електричних і магнітних явищ лише у вакуумі (електродинаміка вакуума). Вплив речовини на зовнішнє електричне чи магнітне поле в навчально-методичній літературі до тепер розглядаються лише на рівні навчальних посібників [7-9] і тому проблема побудови методики викладання питань електродинаміки суцільних середовищ потребують невідкладної уваги.

Тема «Електромагнітне поле при наявності речовини» включає широкий спектр методичних питань, який неможливо освітити в одній статті. Тому **метою даної статті** є узагальнення методичних доробок викладання лише питання про механізм впливу діамагнетиків на зовнішнє магнітне поле і розробка оптимальної методики навчання зазначеного питання, яка б поєднувала точність та наукову глибину з лаконічністю і доступністю сприйняття матеріалу.

**Виклад основного матеріалу.** Із загального курсу фізики студенти знають, що в природі існують речовини, які зменшують зовнішнє магнітне поле. Такі речовини одержали назву - діамагнетики. У діамагнетиках, при відсутності зовнішнього магнітного поля, атоми (молекули) не мають власного магнітного моменту, тобто векторна сума магнітних моментів, які пов'язані із орбітальним рухом окремих електронів, дорівнює нулю.

Розглянемо рух довільно взятого електрона в атомі по одній із своїх борівських орбіт (рис. 1), вважаючи її круговою.

Як відомо із класичної механіки, лінійна швидкість  $\vec{v}$  частинки, яка рухається по колу, пов'язана з кутовою швидкістю  $\vec{\omega}$  співвідношенням:

$$\vec{v} = [\vec{\omega}\vec{r}], \quad (I)$$

де  $\vec{r}$  – радіус-вектор частинки, проведений від осі обертання.

Розрахуємо момент імпульсу  $\vec{L}$  електрона відносно центру своєї орбіти (центру атома) і магнітний момент  $\vec{p}_m$  кругового струму, який пов'язаний з рухом електрона. Момент імпульсу за означенням дорівнює:

$$\vec{L} = [\vec{r}\vec{p}] = [\vec{r}\vec{v}]m \quad (II)$$

де  $m$  – маса електрона.

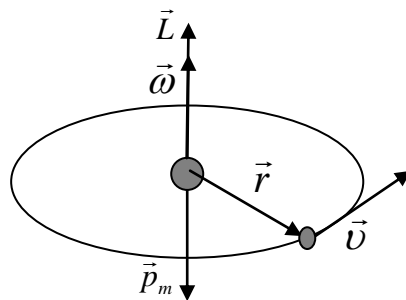


Рис. 1. Рух електрона в атомі

Оскільки сила, яка діє на електрон, напрямлена до центру ядра, то її обертовий момент відносно центру дорівнює нулю і момент імпульсу  $\vec{L}$  електрона відносно центру своєї орбіти (центру атома) є інтегралом руху. Тому, як це випливає із (II), незмінною є й величина  $[\vec{r}\vec{v}] = \frac{\vec{L}}{m} = const$ . Скористаємось цим при визначенні магнітного моменту:

$$\vec{p}_m = \frac{1}{2} \oint_L I[\vec{r}d\vec{l}] = \frac{1}{2} \int_0^T I[\vec{r}\vec{v}]dt = \frac{1}{2} [\vec{r}\vec{v}] I \int_0^T dt = \frac{e}{2} [\vec{r}\vec{v}]$$

де  $e$  – заряд електрона,  $T$  – період обертання електрона навколо ядра,  $d\vec{l} = d\vec{r} = \vec{v}dt$ . Таким чином, магнітний момент електрона в атомі визначається наступним чином:

$$\vec{p}_m = \frac{e}{2} [\vec{r}\vec{v}]. \quad (III)$$

Зіставляючи формули (II) і (III), одержимо зв'язок між знайденими характеристиками електрона:

$$\vec{L} = \frac{2m}{e} \vec{p}_m. \quad (IV)$$

Враховуючи заряд електрона, приходимо до висновку, що момент імпульсу електрона і магнітний момент струму, який існує завдяки руху електрона навколо ядра атому, завжди протилежно напрямлені.

Розглянемо поведінку одного із електронів, що обертаються в атомі, при внесенні атома в магнітне поле.

Студентам відомо, що з боку зовнішнього магнітного поля на замкнутий струм діє обертальний момент:  $\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]$ , який прагне повернути магнітний момент уздовж поля.

Підставляючи цей вираз у відому із механіки теорему про зміну момента імпульсу  $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$ , і враховуючи вираз (IV), одержимо:

$$\frac{d\vec{p}_m}{dt} = \left[ \left( -\frac{e}{2m} \vec{B} \right) \vec{p}_m \right]. \quad (V)$$

Із математики відома формула Пуассона: якщо деякий вектор  $\vec{a}$  обертається навколо свого початку із кутовою швидкістю  $\vec{\omega}$ , то похідна від цього вектора за часом дорівнює:

$\frac{d\vec{a}}{dt} = [\vec{\omega} \vec{a}]$ . Ілюстрацією цієї теореми в механіці є вже використана нами формула:

$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = [\vec{\omega} \vec{r}]$ . Тому вираз (V) слід трактувати, як формулу Пуассона, у якій кутова швидкість обертання вектора  $\vec{p}_m$  дорівнює:

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{2m} \vec{B}. \quad (VI)$$

Із цієї формули видно, що вектори  $\vec{\omega}$  і  $\vec{B}$  мають однаковий напрям. Таким чином, приходимо до висновку, що при внесенні атома у зовнішнє магнітне поле вектор  $\vec{p}_m$  (отже, і вектор  $\vec{L}$ ) обертатиметься навколо вектора магнітної індукції з кутовою швидкістю (VI), яка залежить від величини магнітної індукції. Внаслідок цього електрони атома в магнітному полі одержать додаткове обертання – вся орбіта починає обертатися навколо вектора індукції (рис. 2). Такий рух орбіти одержав назву прецесія. Повною аналогією цьому є обертання дитячої іграшки – дзиги у гравітаційному полі Землі.

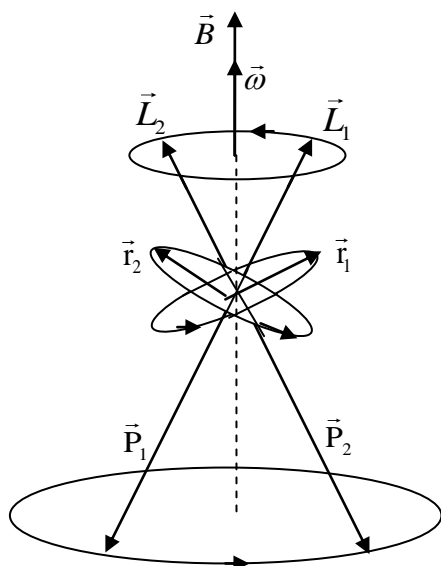


Рис. 2. Прецесія орбіти електрона в магнітному полі

Висновок про прецесію орбіти електронів у атомі, що знаходиться в магнітному полі, відомий у фізиці як теорема Лармора, а кутова швидкість, яка визначається виразом (VI),

називається швидкістю ларморівської прецесії. Додаткове обертання електрона повинне призвести до появи додаткового магнітного моменту. Щоб його розрахувати, необхідно використати формулу (III). Врахуємо при цьому, що електрони в атомі – це квантові частинки і їх не можна розглядати як точкові. У деякому наближенні їх можна вважати розмитими по електронній оболонці атому з певною густиною  $\rho$ . У такому наближенні весь об'єм електронної оболонки потрібно умовно розбити на нескінченно малі об'єми  $dV$  із зарядами  $\rho dV$ , які можна вважати точковим. Довільно взятий такий точковий заряд, внаслідок ларморівської прецесії, тобто під дією зовнішнього магнітного поля, одержить додаткову швидкість  $\vec{u}$ , а значить і додатковий магнітний момент (III):

$$d\vec{p}_m = \frac{\rho dV}{2} [\vec{r}\vec{u}], \quad (\text{VII})$$

де  $\vec{u}$  – додаткова лінійна швидкість точкового заряду  $\rho dV$  в його обертальному русі з ларморівською кутовою швидкістю (VI). Весь атом, внаслідок прецесії, отримає додатковий магнітний момент  $\Delta\vec{p}_m$ , який визначиться підсумовуванням (VII) по всьому об'єму атома:

$$\Delta\vec{p}_m = \frac{1}{2} \int_V \rho dV [\vec{r}\vec{u}].$$

З урахуванням виразу (I), який потрібно застосувати до швидкості  $\vec{u}$ ,

$$\Delta\vec{p}_m \text{ визначиться наступним чином: } \Delta\vec{p}_m = \frac{1}{2} \int_V [\vec{r}[\vec{\omega}_L \vec{r}]] \rho dV.$$

Використовуючи відому формулу векторної алгебри для подвійного векторного добутку і враховуючи при цьому, що вектори  $\vec{r}$  і  $\vec{\omega}_L$  взаємно перпендикулярні, додатковий магнітний момент атома запишеться у вигляді:

$$\Delta\vec{p}_m = \frac{1}{2} \vec{\omega}_L \int_V r^2 \rho dV. \quad (\text{VIII})$$

Розподіл густини заряду  $\rho$  в об'ємі атома невідомий, але структура підінтегрального виразу в (VIII) дозволяє виконати його оцінку і без інтегрування. Дійсно, інтеграл у виразі (VIII) включає наступну послідовність дій: 1) - об'єм електронної оболонки атома умовно розбивається на точкові заряди  $\rho dV$ ; 2) - всі ці точкові заряди множаться на квадрат їх відстані до осі обертання; 3) - одержані значення цих добутків підсумовуються по всьому об'єму. Одержаний результат, очевидно, буде рівним результату множення заряду всієї оболонки  $ze$  на середнє значення всіх квадратів  $\langle r^2 \rangle$  відстані елементарних зарядів  $\rho dV$  до осі обертання. Тому додатковий магнітний момент (VIII) всього атома у магнітному полі буде дорівнювати:

$$\Delta\vec{p}_m = \frac{1}{2} \langle r^2 \rangle \vec{\omega}_L ze, \quad (\text{IX})$$

де  $z$  – число електронів в атомі.

Нехай вісь  $z$  декартової системи координат співпадає з напрямом вектора індукції, а значить – із напрямом, ларморівської кутової швидкості. Тоді, вважаючи атом центральносиметричним, можна записати:

$$\begin{aligned}\langle r^2 \rangle &= \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle; \\ \langle R^2 \rangle &= \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle + \langle z^2 \rangle; \\ \langle x^2 \rangle &= \langle y^2 \rangle = \langle z^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle R^2 \rangle,\end{aligned}\tag{X}$$

де  $\langle R^2 \rangle$  – середня відстань елемента  $\rho dV$  від центру атома.

З урахуванням (VI) і (X), остаточний вираз для додаткового магнітного моменту атома, який він набуває при внесенні його в магнітне поле, набуває вигляду:

$$\Delta \vec{p}_m = -\frac{ze^2 \langle R^2 \rangle}{6m} \vec{B}.$$

Із одержаного виразу видно, що вектори  $\vec{P}_m$  і  $\vec{B}$  направлені в протилежні сторони. Оскільки вектор індукції власного поля кругового струму і його магнітний момент однаково орієнтовані, то вектор індукції власного магнітного поля атомів, яке виникає внаслідок описаного діаманітного ефекту, буде направлений протилежно вектору індукції зовнішнього поля. Отже, діаманітний ефект, як вже наголошувалося, зменшує зовнішнє поле, тобто магнітна сприйнятливість речовин, у яких виявляється лише діаманітний ефект, негативна.

**Висновки та перспективи подальших наукових пошуків.** Розглянута методика подання питання про механізм намагнічення діаманетиків охоплює усі ключові аспекти цієї теми, не містить надмірної інформації і математичних ускладнень і тому, як показує власний досвід викладання теоретичної фізики, досить легко сприймається студентами.

Аналіз літературних джерел також показує, що залишається невирішеним питання і про методичне обґрунтування у навчальному процесі підготовки вчителів фізики механізму намагнічення пара і феромагнетиків та їх впливу на зовнішнє магнітне поле.

### *Список використаної літератури*

1. Горбач В.Н. Моделирование магнитных полей соленоидальных магнитных систем. /В.Н. Горбач, А.Я. Сало // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг: Видавничий відділ КДПУ, 2001. – Том 2.– С. 90-94.
2. Соколовський О.Й. До методики викладання питання про одиниці вимірювання основних електродинамічних величин. / Соколовський О.Й. // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики. Збірник наукових праць.– Кривий Ріг: Видавничий відділ НМетАУ, 2003. – Випуск 3, Том 2. – С 309-312.
3. Благодаренко Л.Ю. Теоретико-методичні засади реалізації фізичної компоненти державного стандарту базової середньої освіти: дис. доктора пед. наук: 13.00.02 / Благодаренко Людмила Юріївна. –К., 2011. – 455 с.
4. Вознюк С.Ю. Формування поняття «електромагнітне поле» на основі фундаментальних фізичних понять / С.Ю. Вознюк, В.І. Кульчицький // Фізика та астрономія в школі. – 1999. – № 4. – С. 43–47.

5. Бендес Ю.П. Інновації щодо вивчення теми електромагнітні коливання. / Ю.П. Бендес, В.Д. Сиротюк // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету. Серія педагогічна. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет, 2008. – Вип. 14. – С. 9-13.
6. Коновал О.А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності: монографія / О.А.Коновал. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009. – 346 с.
7. Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. – М.: Наука, 1966. – 624 с.
8. Терлецкий Я.П. Электродинамика: учеб. пособие для студ. физ. спец. ун-тов / Я.П. Терлецкий, Ю.П. Рыбаков. – М.:Высшая шк., 1990. – 352 с.
9. Мороз І.О. Основи електродинаміки. Магнітостатика: навчальний посібник (гриф МОН України: лист №1/11-6715 від 21 липня 2010 р.) / І.О. Мороз. – Суми: Видавництво «МакДен», 2011. – 162 с.

***Мороз И.А. Элементарная теория намагничивания диамагнетиков в системе подготовки учителя физики.***

*Анализируется состояние преподавания некоторых вопросов электродинамики сплошных сред. Рассматривается методика представления в учебном процессе подготовки учителя физики механизма влияния диамагнетиков на внешнее магнитное поле. Предлагается оригинальный способ оценки дополнительного магнитного момента, который возникает в результате прецессии электронов в атомах во внешнем магнитном поле.*

***Ключевые слова:*** магнитный момент, теорема Лармора, скорость прецессии, вектор намагничивания.

***Moroz I.O. An elementary theory of magnetizing of diamagnetics in the system of training of teacher of physics.***

*Analyzing current state of the some questions of the solid environment's electrodynamics teaching. Considering the delivery method for mechanism of impact of the diamagnetic on the external magnetic field in the Physics lecturer teaching process. Proposing genuine scoring method for the additional magnetic moment which there as result of the precession of the electrons in the atoms in the external magnetic field.*

***Keywords:*** magnetic moment, Larmor's theorem, rotation speed, magnetization vector.