

ФОРМУВАННЯ ПОНЯТТЯ «ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ» У СТУДЕНТІВ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ПОНЯТЬ

У роботі розглядається формування поняття «електромагнітна індукція» на основі системи фундаментальних фізичних понять у студентів технічних спеціальностей вузів у процесі вивчення розділу «Електродинаміка». Розроблено методика формування у студентів технічних спеціальностей вузів поняття «електромагнітна індукція» на основі фундаментальних фізичних понять симетрія, відносність, заряд, електромагнітна взаємодія з точки зору сучасних фізичних теорій.

Ключові слова. Фундаментальні фізичні поняття, система фундаментальних фізичних понять, електромагнітна індукція, електродинаміка, методика формування фундаментальних фізичних понять.

Вивченню явищ електромагнітної індукції (ЕМІ) у технічних вузах 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 поза детальним аналізом фізичної природи ЕМІ.

Разом з тим, у підручниках фізики для технічних вузів [1], [2], 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 [3; 6; 7; 9; 10; 11]. Ми пропонуємо підхід, який дозволяє уникнути цих недоліків, одночасно роблячи навчальний матеріал більш доступним студентам.

Тому метою статті є формування поняття «електромагнітна індукція» у студентів технічних вузів на основі системи фундаментальних фізичних понять (ФФП) та застосування ідей симетрії, відносності, електромагнітної взаємодії, методів диференціального та інтегрального числення для розв'язання студентами задач у процесі вивчення явища електромагнітної індукції з точки зору сучасних фізичних теорій [3, с.75-79; 6, с. 316-320; 7, с. 217-235; 8, с. 181-195; 9, с.264-277; 10, с.50-74;].

У [5] нами було розглянуто один із можливих підходів до вдосконалення методики вивчення ЕМІ у курсі фізики для профільних (фізико-математичних, фізичних, технічних) класів 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 електромагнітне поле (ЕМП).

На нашу думку, у студентів технічних вузів вивчення властивостей ЕМІ та формування відповідного поняття доцільно будувати на основі **ФФП**, зокрема таких як **відносність, симетрія і взаємодія** [5]. Останнє не лише дозволяє провести структурування навчального матеріалу розділу «Електродинаміка», але й дає змогу продемонструвати студентам технічних вузів пізнавальну продуктивність ідей відносності та симетрії, які пронизують всю сучасну фізику [3; 6; 7; 9; 10; 11].

Зупинимось на основних моментах підходу, який ми пропонуємо.

Під час вивчення ЕМІ [5] було встановлено **дві якісно різних причини** появи індукційного джерела струму у провідному контурі в цілому або на його окремих ділянках:

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

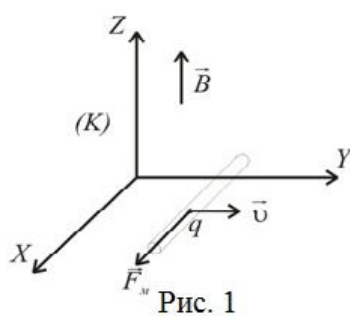
2) дія **електричної сили** \vec{F}_e на вільні заряди ланок контуру, які перебувають в **стані спокою** щодо **нестационарного МП**: $\vec{F}_e = q\vec{E}$, де \vec{E} - напруженість вихрового ЕП, яке збуджується в області перебування ланки контуру під час зміни \vec{B} .

Однак лишається незрозумілим, котре із пояснень відповідає дійсності у випадку зміни взаємної орієнтації контуру і індукції магнітного поля \vec{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 \vec{B} щодо контуру ($|\vec{B}| = const$). Коли спостерігач у СВ, зв'язаній з джерелом МП вважає, що у контурі діють сторонні сили магнітної природи ($\vec{F}_{cm} = \vec{F}_m$), то спостерігач у СВ, зв'язаній з контуром, стверджує, що сторонні сили за своєю природою електричні внаслідок існування вихрового ЕП ($\vec{F}_{cm} = \vec{F}_e$): $\Delta\vec{B}/\Delta t \Rightarrow \vec{E}$. 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 е.р.с. індукції \mathcal{E}_i , лише врахувавши одночасно дію \vec{F}_m та \vec{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: $\vec{F}_{cm} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = \vec{F}_L$, де \vec{E} і \vec{B} - напруженість ЕП і індукція МП відповідно у СВ, по відношенню до якої розглядають те чи інше явище ЕМІ.

У цьому зв'язку розглянемо ЕМІ у **прямолинійній ланці металевого контуру**, яка рухається щодо стаціонарного МП із сталою швидкістю \vec{v} (рис.1) [7, с. 220-222].

У СВ К, зв'язаній з МП: $\vec{F}_{cm} = \vec{F}_m = -e\vec{v} \times \vec{B}$ ($\vec{F}_e = 0$, оскільки $\Delta\vec{B}/\Delta t = 0$). У СВ, зв'язаній із контуром (рис. 2), швидкість **впорядкованого** руху вільних зарядів - носіїв струму рівна нулю, так що $\vec{F}_m' = 0$, і \vec{F}_{cm}' може бути зумовлена лише електричною силою



$\vec{F}_e' = -e\vec{E}'$ (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 е.р.с. індукції**. Тому сторонні сили в обох випадках також повинні бути однакові: $\vec{F}_{cm}' = \vec{F}_{cm}$, тобто $\vec{F}_e' = \vec{F}_m$. Звідси отримуємо:

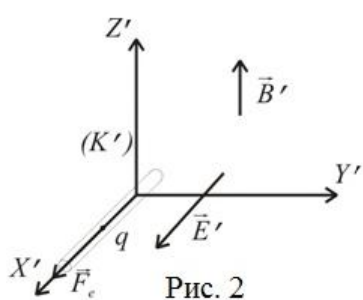
$$\vec{E}' = \vec{v} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Отже, коли у «нерухомій» СВ існує лише МП з магнітною індукцією \vec{B} , у «рухомій» СВ окрім цього існує ЕП з напруженістю $\vec{E}' \perp \vec{B}$. **Електричне поле відносно** у тому розумінні, що його напруженість залежить від того, у якій СВ її вимірюють. Нагадуємо студентам, що з **відносним характером МП** вони вже стикалися раніше. У СВ, зв'язаній з точковим зарядом q , існує лише ЕП з напруженістю:

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3}. \quad (2)$$

У іншій СВ «штриховане», яка рухається щодо заряду і зв'язаного з ним ЕП із швидкістю \vec{v} , поряд з ЕП існує МП, магнітна індукція якого рівна [8, с. 119]:

$$\vec{B}' = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q(-\vec{v}) \times \vec{r}}{r^3}, \quad (3)$$



оскільки сам заряд щодо цієї СВ рухається із швидкістю $(-\vec{v})$.

Порівнюючи (2) і (3), помічаємо, що індукція магнітного поля \vec{B}' заряду q у СВ, щодо якої він рухається зі швидкістю $-\vec{v}$, зв'язана із напруженістю електричного поля \vec{E} у СВ, щодо якої він нерухомий:

$$\vec{B}' = -\epsilon_0\mu_0\vec{v} \times \vec{E}. \quad (4)$$

Враховуючи, що довільне ЕП може розглядатися як суперпозиція електричних полів певної сукупності точкових зарядів, слід визнати, що формула (4) має загальний характер, так що із нею 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 формули (1) і (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 ЕП з напруженістю \vec{E} та МП з магнітною індукцією \vec{B} , то з врахуванням принципу суперпозиції ЕП та МП:

$$\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}; \quad \vec{B}' = \vec{B} - \epsilon_0\mu_0\vec{v} \times \vec{E}. \quad (5)$$

Зауважуємо, що ці співвідношення підтверджуються дослідом, 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**. Звертаємо увагу на певну **симетрію** (наявність множника $\epsilon_0\mu_0$ визначається лише вибором системи одиниць), яка існує у записі співвідношень (5). Вона вказує на **рівноправність електричного і магнітного полів** та нашоухує на думку про їх нерозривний зв'язок [6, с. 72-77].

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 (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 (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 [7, с. 233; 9, с. 271-275]].

Повертаємось до розгляду ЕМІ. Візьмемо контур із рухомою перемичкою завдовжки l . Помістимо його у однорідне МП, яке перпендикулярне площині контуру і напрямлене за площину (рис. 3) [8, с. 183; 9, с. 265; 10 с. 50]. Рухатимемо перемичку зі швидкістю \vec{v} . Із такою ж швидкістю будуть переміщатися відносно МП і носії струму – електрони. На кожен електрон діє сила: $\vec{F}_{II} = -e[\vec{v} \times \vec{B}]$, яка напрямлена вздовж перемички (рис. 3). Дія цієї сили еквівалентна дії на електрон ЕП з напруженістю $\vec{E} = -e[\vec{v} \times \vec{B}]$.

Це поле не електростатичного походження. Його циркуляція по контуру дає величину е.р.с., яка індукується у контурі: $\mathcal{E}_i = \oint \vec{E} d\vec{l} = \oint [\vec{v} \times \vec{B}] d\vec{l} = \int_1^2 [\vec{v} \times \vec{B}] d\vec{l}$.

Виберемо нормаль, як зображено на рис. 3. Тоді потрібно обходити контур за годинниковою стрілкою, тому $d\vec{l}$ має напрямок, вказаний на малюнку.

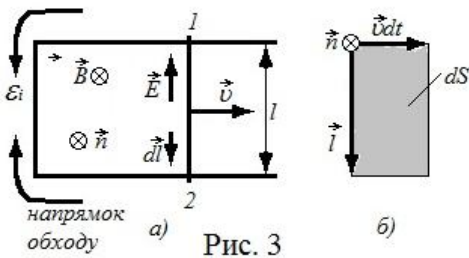


Рис. 3

Отримаємо, $\mathcal{E}_i = [\vec{v} \times \vec{B}] \int d\vec{l} = [\vec{v} \times \vec{B}] \vec{l}$.

$$\mathcal{E}_i = \vec{B} [\vec{l} \times \vec{v}] = \frac{\vec{B} [\vec{l} \times \vec{v} dt]}{dt} = \frac{-\vec{B} n dS}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (6)$$

Отримали, що \mathcal{E}_i та $\frac{d\Phi}{dt}$ мають протилежні

знаки. або «е.р.с. індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує контур» (закон Фарадея). Якщо магнітний потік лінійно змінюється з часом, або розглядаються його зміни за досить короткі проміжки часу, то е.р.с. індукції записується у вигляді: $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, де $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ - зміна магнітного потоку за час Δt .

Оскільки е.р.с. довільного джерела струму рівна механічній роботі сторонніх сил \vec{F}_{cm} по перенесенню одиничного додатного заряду у електричному колі - замкнутому провідному контурі, для е.р.с. джерела \mathcal{E}_i , яке індукується у довільному контурі у випадку нестационарного МП, отримуємо:

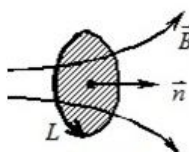
$$\mathcal{E}_i = \frac{A_{cm}}{q} = \frac{\sum_{(l)} (F_{cm})_i \cdot \Delta l}{q} = \frac{\sum_{(l)} (qE_i) \cdot \Delta l}{q} = \frac{q \sum_{(l)} E_i \cdot \Delta l}{q} = \sum_{(l)} E_i \cdot \Delta l, \quad (7)$$

де E_i – проекція напруженості вихрового ЕП, збудженого нестационарним МП, на малу ділянку контуру довжиною Δl ($\Delta l \ll l$ – довжини контуру, або формально $\Delta l \rightarrow 0$), а величина $\sum_{(l)} E_i \Delta l$ у випадку $\Delta l \rightarrow 0$ - *циркуляція \vec{E} по контуру (l)*. Оскільки згідно із

законом Фарадея для ЕМІ: $\mathcal{E}_i = -\Delta\Phi / \Delta t$, то отримуємо:

$$\sum_{(l)} E_l \Delta l = -\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}, \quad (8)$$

(Індекс «B» у правій частині введений, щоб підкреслити, що мова йде про потік вектора індукції МП \vec{B}). В інтегральній формі (6) записується:



$$\oint_{(L)} \vec{E}_l \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \left(\oint_S \vec{B}_n \cdot d\vec{S} \right), \quad (9)$$

Рис. 4

де обхід контуру L , який обмежує поверхню S , та напрямок нормалі \vec{n} пов'язані правилом свердлика (рис. 4), а \vec{E} позначає напруженість поля сторонніх сил. Співвідношення (9) є формалізованим описом однієї із **фундаментальних властивостей ЕМП: нестационарне (змінне у часі) МП збуджує вихрове ЕП, для якого $\vec{E} \perp \Delta \vec{B}$, причому циркуляція напруженості ЕП по довільному контуру рівна з протилежним знаком швидкості зміни потоку магнітної індукції цього МП через довільну поверхню, натягнуту на цей контур** (перше основне положення теорії Максвелла) (рис. 5) [7, с. 232; 9, с. 271].

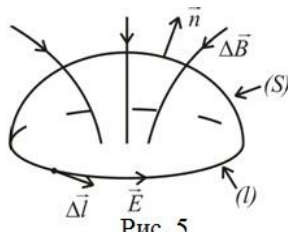


Рис. 5

У випадку переміщення провідника відносно джерела поля природа сторонніх сил зводиться до сили Лоренца (рис. 6). Якщо ж зміна магнітного потоку пов'язана зі зміною величини і напрямку поля \vec{B} , то явище електромагнітної індукції пояснюється на основі (9). Замкнутість силових ліній \vec{E} для вихрового поля забезпечує відмінне від нуля значення контурного інтегралу (рис.5) у лівій частині (9).

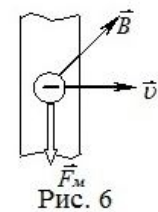


Рис. 6

Однак, оскільки ЕП та МП є рівноправними компонентами ЕМП, а у природі по відношенню до довільного процесу (явища) існує обернений, то слід очікувати, що нестационарне ЕП є причиною вихрового МП, для якого $\vec{B} \perp \Delta \vec{E}$. При цьому симетрія (5) щодо перестановок \vec{E} і \vec{B} та \vec{E}' і \vec{B}' наштовхує на думку, що повинно існувати співвідношення, аналогічне (9), яке зв'язувало б \vec{B} і \vec{E} (точніше, циркуляцію \vec{B} та швидкість зміни потоку \vec{E}) і яке відрізнялося б від (9) лише перестановкою \vec{B} і \vec{E} та, можливо, деяким сталим множником, подібно до $(-\epsilon_0 \mu_0)$ у (5) [7, с. 220-222]. Ці міркування використовуємо у подальшому під час вивчення струмів зміщення та рівнянь Максвелла.

На практичних заняттях в якості основних задач явища ЕМП розглядаємо задачі знаходження е.р.с. індукції \mathcal{E}_i . При проведенні фізичного аналізу з'ясуємо причини зміни магнітного потоку Φ та визначаємо його через поверхню, обмежену замкнутим контуром, як функцію від часу t , тобто $\Phi = \Phi(t)$.

Задача 1. В магнітному полі, індукція якого змінюється за законом $\vec{B} = (\alpha + \beta t^2) \vec{i}$, де $\alpha = 10^{-1} \text{Тл}$, $\beta = 10^{-2} \text{Тл}/\text{с}^2$, \vec{i} - одиничний вектор осі Ox , знаходиться квадратний контур зі стороною $a = 20 \text{см}$, причому площина контуру перпендикулярна до \vec{B} . Визначити е.р.с. індукції в контурі в момент часу $t = 5 \text{с}$.

Розв'язання. Фізична система складається зі змінного в часі МП, провідного контуру, який міститься у цьому полі, вихрового ЕП, яке збуджується та створює індукційний струм у замкнутому контурі. Причиною зміни магнітного потоку через рамку є зміна з часом індукції магнітного поля. Визначаємо магнітний потік через контур:

$$\Phi = \vec{B}\vec{S} = (\alpha + \beta t^2)a^2. \quad (10)$$

Далі знаходимо е.р.с. індукції:

$$|\mathcal{E}_i| = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = 2\beta a^2 t, \quad |\mathcal{E}_i| = 4 \cdot 10^{-3} \text{ В}. \quad (11)$$

Формулюємо узагальнену задачу першого типу: в МП, індукція якого змінюється за законом $\vec{B} = f(t)\vec{i}$ (магнітне поле однорідне і нестационарне), де $f(t)$ - довільна (але диференційована) функція від часу t , розміщений плоский контур площі S , площина якого перпендикулярна до \vec{B} . Визначити е.р.с. індукції у контурі в довільний момент часу t .

Розв'язання цієї узагальненої задачі першого типу може бути отримано за допомогою рівнянь (10) і (11) в узагальненому вигляді:

$$\Phi = \vec{B}\vec{S} = f(t)\vec{i} \cdot \vec{S}, \quad (12)$$

$$|\mathcal{E}_i| = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = f'(t) \cdot S. \quad (13)$$

Далі переходимо до розв'язання задач другого типу, розглядаючи фізичні явища, пов'язані з індукційним струмом (теплові, магнітні і т.д.). У задачі 1 визначимо кількість теплоти, яка виділяється в контурі за перші 5 с, якщо опір контуру $R = 0,5 \text{ Ом}$.

За законом Ома знаходимо силу індукційного струму в контурі, при цьому нехтуємо індукцією і ємністю контуру:

$$I = \mathcal{E}_i / R = 2\beta a^2 t / R \quad (14)$$

Сила струму не постійна, тому для визначення шуканої кількості теплоти застосуємо методи диференціального та інтегрального числення:

$$Q = \int_0^5 I^2 R dt = \int_0^5 \frac{4\beta^2 a^4 t^2}{R^2} R dt = \frac{4\beta^2 a^4 t^3}{3R} \Big|_0^5 \quad (15)$$

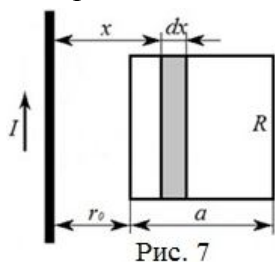
Підстановка числових значень дає: $Q \approx 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$.

Легко сформулювати і розв'язати узагальнену задачу другого типу: в МП, індукція якого змінюється за законом $\vec{B} = f(t)\vec{i}$, де $f(t)$ - довільна (але диференційована) функція від часу t , розташований плоский контур площі S з омичним опором R , площина якого перпендикулярна вектору \vec{B} . Визначити кількість теплоти, яка виділиться в контурі за час t .

Враховуючи (12)-(15), знаходимо розв'язок задачі другого типу:

$$Q = \frac{S^2}{R} \int_0^t [f'(t)]^2 dt. \quad (16)$$

Якщо в умові задачі 1 МП не однорідне, то рівняння (12) не можна використовувати, а для розрахунку магнітного потоку необхідно використати методи диференціального та інтегрального числення. Формулюємо задачу третього типу.



Задача 2. У площині квадратного контуру з омичним опором $R = 7 \text{ Ом}$ і стороною $a = 20 \text{ см}$ розташований на відстані $r_0 = 20 \text{ см}$ від нього прямий нескінчений провідник, паралельний одній із сторін контуру (рис. 7). Сила струму у провіднику змінюється за законом $I = \alpha t^3$, де $\alpha = 2 \text{ А/с}^3$. Знайти силу струму у контурі в момент часу $t = 10 \text{ с}$.

Розв'язання. Внаслідок зміни сили струму у провіднику, магнітний потік через квадратний контур змінюється і у ньому виникає індукційний струм.

Контур знаходиться в неоднорідному МП. Тому для розрахунку магнітного потоку використаємо методи диференціального та інтегрального числення.

Розділимо площу контуру на настільки вузькі смужки (рис. 7), щоб у межах кожної смужки МП можна було вважати однорідним. Елементарний магнітний потік через вузьку смужку $d\Phi = B a dx = \frac{\mu_0 I a dx}{2\pi x}$. Інтегруючи це рівняння по x у межах від r_0 до r_0+a , знаходимо

$$\Phi = \int_{r_0}^{r_0+a} \frac{\mu_0 I a dx}{2\pi x} = \frac{\mu_0 a \alpha \ln(1+a/r_0)}{2\pi} t^3. \text{ За законом Фарадея визначаємо е.р.с. індукції}$$

$$\mathcal{E}_i = \frac{3\mu_0 a \alpha \ln(1+a/r_0)}{2\pi} t^2 \text{ та силу струму } I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{3\mu_0 a \alpha \ln(1+a/r_0)}{2\pi R} t^2. I = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ A.}$$

Розглядаємо задачу четвертого типу.

Задача 3. Контур (див. задачу 2, рис. 7) віддаляється від нескінченного провідника з швидкістю $v = 100 \text{ м/с}$ в напрямку, перпендикулярному до провідника. У провіднику тече постійний струм $I = 10 \text{ А}$. Визначити е.р.с. індукції в контурі через $t = 10 \text{ с}$ від початку руху, якщо в початковий момент часу контур знаходився на відстані $r_0 = 20 \text{ см}$ від провідника.

Розв'язання. Сила струму у провіднику постійна, і МП, створене цим струмом, також не змінюється в часі. Однак магнітний потік через контур не постійний внаслідок того, що положення контуру відносно МП змінюється. Знайдемо магнітний потік через контур як функцію від часу t . Застосуємо методи диференціального та інтегрального числення, (аналогічно, як у задачі 2) отримаємо:

$$\Phi = \frac{\mu_0 I a}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{a}{x}\right), \quad (17)$$

де $x = vt + r_0$ - відстань контуру від провідника в момент часу t . Диференціюючи рівняння (17) по часу t за законом Фарадея знаходимо вираз для е.р.с. індукції в контурі:

$$\mathcal{E}_i = \frac{\mu_0 I a^2 v}{2\pi(a + vt + r_0)(vt + r_0)}. \text{ Виконуючи обчислення } (vt \gg r_0, vt \gg a; \text{ при } t > 10^{-1} \text{ с і}$$

величинами r_0 і a в дужках можна знехтувати), отримаємо $\mathcal{E} = 8 \cdot 10^{-13} \text{ В}$.

Числове значення е.р.с. дуже мале, бо контур рухається з великою швидкістю і через проміжок часу $t = 10 \text{ с}$ буде знаходитися від провідника на відстані $x = 1 \text{ км}$, де МП дуже слабке та зміна магнітного потоку через контур також дуже мала. Змінимо умову задачі 3.

Задача 4. Нехай в умові задачі 3 від нескінченно довгого провідника віддаляється зі швидкістю v не весь контур, а лише його права сторона довжиною a (рис. 7). Опір контуру рівний R . Опір підвідних провідників і рухомої сторони a дорівнює нулю. Визначити силу струму в контурі в довільний момент часу t .

Розв'язання. Нехай I - сила струму в нескінченно довгому провіднику. За умовою він постійний. Зміна магнітного потоку через контур зумовлена рухом перемички a . Застосовуючи методи диференціального та інтегрального числення, знаходимо магнітний потік Φ через контур:

$$\Phi = \int_{r_0}^{vt} \frac{\mu_0 \mu I a}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0 \mu I a}{2\pi} \ln\left(\frac{v}{r_0} t\right), \quad (18)$$

тоді е.р.с. індукції та сила індукційного струму I_s : $\mathcal{E}_i = \frac{\mu_0 \mu I a}{2\pi}$; $I_s = \frac{\mu_0 \mu I a}{2\pi R t}$. Якщо сила струму в провіднику змінюється з часом за законом $I = f(t)$, то у формулі (18) $\Phi = \frac{\mu_0 \mu f(t)}{2\pi} \ln\left(\frac{v}{r_0 t}\right)$. Отже, $\mathcal{E}_i = \frac{\mu_0 \mu f'(t)}{2\pi} \ln\left(\frac{v}{r_0 t}\right) + \frac{\mu_0 \mu f'(t)}{2\pi t}$, $I_s = \frac{\mu_0 \mu f'(t)}{2\pi R} \ln\left(\frac{v}{r_0 t}\right) + \frac{\mu_0 \mu f'(t)}{2\pi R t}$.

Висновки. Застосування запропонованого підходу сприяє не лише формуванню поняття «електромагнітна індукція» у відповідності до його розуміння у сучасній фізичній науці, але й створює передумови для якісного засвоєння студентами технічних спеціальностей вузів змісту поняття «електромагнітне поле» (ЕМП). Формування у студентів поняття «електромагнітна індукція» на основі фундаментальних фізичних понять симетрія, відносність, заряд, електромагнітна взаємодія у процесі вивчення розділу «Електродинаміка» не лише структурує навчальний матеріал, але й демонструє пізнавальну продуктивність ідей відносності та симетрії, які пронизують всю сучасну фізику [3; 6; 7; 9; 10; 11]. Завдяки запропонованому підходу виникають перспективи подальших досліджень та розробки для студентів технічних спеціальностей вузів методики вивчення електромагнітного поля та фізики мікросвіту на основі фундаментальних фізичних понять та принципів.

Список використаної літератури

1. Бушок Г.Ф. Курс фізики: навчальний посібник. Т. 1 / Г.Ф. Бушок, Г.Ф. Півень. – К.: Вища школа, 1981. – 408 с.
2. Детлаф, А.А. Курс фізики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: ВШ, 1989. – 608 с.
3. Коновал О. А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності: монографія / О. А. Коновал; МОН України; КДПУ. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009. – 346 с.: іл.
4. Коршак Є. В. Фізика, 10 кл. : [підруч. для загальноосв. навч. закл.] / Є. В. Коршак, О. І. Ляшенко, В. Ф. Савченко. – К.; Ірпінь : ВТФ «Перун», 2003. – 312 с. : іл.
5. 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 ТДПУ. Серія: Педагогіка і психологія – Тернопіль, 1998. –№ 5. –С. 120–127.
6. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм : [учеб. пособие]. – М. : Высшая школа, 1983. – 463 с.
7. Парселл Э. Электричество магнетизм. Серия "Берклевский курс физики" / Э Парселл. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – Т.2. – 416 с.
8. 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.
9. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Электричество / Д. В. Сивухин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. – Т.3. – 688 с.
10. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Электродинамика / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1966. – Т.6. – 344 с.
11. Шут М. І. Електрика та магнетизм: [навч.-метод. посіб. для самост. роботи] / М. І. Шут. – К., 2002. – 236 с.

Кульчицкий В.И. Формирование понятия «электромагнитная индукция» у студентов на основе системы фундаментальных физических понятий.

В работе рассматривается формирование понятия «электромагнитная индукция» на основе системы фундаментальных физических понятий у студентов технических специальностей вузов в процессе изучения раздела «Электродинамика». Разработана методика формирования у студентов понятия «электромагнитная индукция» на основе фундаментальных физических понятий симметрия, относительность, заряд, электромагнитное взаимодействие из точки зрения современных физических теорий. В работе разработана методика решения задач, которая способствует формированию понятия «электромагнитная индукция» на основе системы фундаментальных физических понятий у студентов технических специальностей вузов с использованием методов дифференциального и интегрального исчисления. Данный подход позволяет студентам качественно усвоить первое основное положение теории Максвелла: нестационарное магнитное поле создает вихревое электрическое поле - одно из фундаментальных свойств электромагнитного поля. Применение разработанной методики способствует не только формированию понятия «электромагнитная индукция» в соответствии с его пониманием в современной физической науке, но и создает условия для качественного усвоения студентами технических специальностей вузов содержания понятия «электромагнитное поле». Формирование понятия «электромагнитная индукция» на основе системы фундаментальных физических понятий симметрия, относительность, заряд, электромагнитное взаимодействие у студентов технических специальностей вузов в процессе изучения раздела «Электродинамика» не только структурирует учебный материал, но и демонстрирует познавательную производительность идей относительности и симметрии в современной физической науке. Данный подход способствует разработке методики изучения электромагнитного поля и квантовой физики для студентов технических специальностей вузов на основе фундаментальных физических понятий и принципов.

Ключевые слова. *Фундаментальные физические понятия, система фундаментальных физических понятий, электромагнитная индукция, электродинамика, методика формирования фундаментальных физических понятий.*

Kulchitskiy V. The formation of concepts "electromagnetic induction" in the system on the basis of students fundamental physical concepts.

The article deals with the problem of development of "electromagnetic induction" concept on the basis of system of fundamental physical concepts for students of engineering majors learning the "Electrodynamics" section. The method of formulation for engineering students the notion of "electromagnetic induction" based on fundamental physical concepts as symmetry, relativity, charge, electromagnetic interaction from the point of view of modern physical theories is developed in this article.

Keywords. *Fundamental physical concepts, system of fundamental physical concepts, electromagnetic induction, electrodynamics, methods of formation of fundamental physical concepts.*