

Міністерство освіти та науки України  
Національна металургійна академія України

Теорія та методика  
навчання математики,  
фізики, інформатики

*Збірник наукових праць  
Випуск VI*

Том 2

Кривий Ріг  
Видавничий відділ НМетАУ  
2006

## ПОНЯТТЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ

Г.П. Половина, О.О. Гуманський

м. Кривий Ріг, Криворізький державний педагогічний університет

Серед понять електродинаміки, що вивчаються в середній школі, поняття електрорушійної сили (ЕРС) є одним з основних і в залежності від того, як учні зрозуміють фізичний зміст цієї величини, вони будуть вільно чи з труднощами оперувати з енергетичними перетвореннями, що відбуваються в електричному колі.

Але, як показують випускні екзамени шкіл та вступні іспити до ВНЗ, поняття ЕРС учнями засвоюється формально. І причин складності в засвоєнні та розумінні фізичного змісту цього поняття декілька. Почнемо зі слова «сила», яке входить до назви. Адже поняття сили, як стверджує Р. Фейнман [1, 209], є одним із найбільш складних для засвоєння. До того ж електрорушійна сила є не силою, а енергетичною характеристикою стаціонарного електричного поля.

Проаналізуємо означення електрорушійної сили, яке дається в різних підручниках, щоб переконатись, що труднощі в засвоєнні цього поняття походять від неоднозначного визначення ЕРС та ряду протиріч, що зустрічаються при поданні цього матеріалу.

В підручнику [2, 180] дається означення ЕРС в замкненому контурі через відношення роботи сторонніх сил при переміщенні заряду вздовж контуру до заряду.

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q}.$$

Можна говорити про ЕРС на будь-якій ділянці кола. Це питома робота сторонніх сил не на всьому контурі, а тільки на заданій ділянці кола. ЕРС гальванічного елемента є робота по переміщенню одиничного додатного заряду всередині елемента від одного полюса до другого.

Робота сторонніх сил не може бути визначена через різницю потенціалів, оскільки сторонні сили не є потенціальними та їх робота залежить від форми траєкторії. Так, робота сторонніх сил при переміщенні заряду між клемми джерела струму за його межами дорівнює нулеві.

В [3, 529] дається означення ЕРС як суми напруги на клеммах джерела струму та напруги на зовнішньому колі. За відсутності струму напруга на клеммах елемента дорівнює його ЕРС.

В методичному посібнику [4, 141] сказано, що ЕРС чисельно дорівнює роботі сторонніх сил, що переміщують одиничний позитивний заряд вздовж замкненого кола. ЕРС характеризує роботу сторонніх сил не лише на ділянці, яка є джерелом струму, але і на тих ділянках, де заряди переміщуються під впливом електростатичних сил; енергія поля також визначається робо-

тою сторонніх сил.

В підручнику [5, 203] показано, що коли зовнішня частина електричного кола розімкнена, то напруженість поля сторонніх сил і електричних сил в джерелі однакові за значенням і протилежні за напрямком, тому компенсують одне одного. А ЕРС джерела визначається роботою сторонніх сил в джерелі при розділенні заряджених частинок з сумарним зарядом в одну одиницю:

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q}.$$

ЕРС є характеристикою джерела і не залежить від того, яке зовнішнє навантаження приєднують до його полюсів.

В [6, 155] сказано, різниця потенціалів може вважатись причиною руху електрики, тому вона називається електрорушійною силою. На думку авторів [6], ЕРС, так само як і потенціал та напруга, не є силами; це енергетичне поняття, що відповідає потенціальній енергії одиничного електричного заряду.

В [7, 100] зазначається, що ЕРС дорівнює відношенню роботи, яка здійснюється при переміщенні заряду по замкнутому колу один раз, до величини переміщуваного заряду.

Таким чином, цей далеко не повний перелік означень щодо трактування фізичного змісту ЕРС свідчить, що основні розбіжності стосуються:

а) нечіткого розмежування напруженості потенціального поля та напруженості поля сторонніх сил в замкнутому електричному колі;

б) означення ЕРС як роботи з переміщення одиничного заряду вздовж всього кола (де робота виконується і силами електростатичного поля, і сторонніми силами) чи роботи з переміщення одиничного заряду на окремій ділянці електричного кола, де діють лише сторонні сили.

На наш погляд, питання про фізичний зміст ЕРС найбільш наочно і аргументовано викладено в [8, 319], де показано, що ЕРС є робота сторонніх сил на ділянці де є ці сторонні сили:

$$\frac{A}{q} = \int_1^2 E^{cm} dl = \varepsilon,$$

а не на всьому замкнутому полю.

Для розуміння ЕРС має велике значення розуміння поняття «сторонні сили». При першому знайомстві з ЕРС поняття сторонніх сил пов'язується з хімічними джерелами струму. Тут сторонніми силами є сили хімічного походження.

До питання ЕРС та сторонніх сил треба повертатись при вивченні термоелектричних явищ. Термоелектрорушійна сила пропорційна різниці температур і залежить від підбору пари контактуючих металів.

Сторонні сили в напівпровідниковому фотоелементі обумовлені енергією квантів, що здатні вибивати електрони з речовини.

Електрофорна машина дає приклад того, що механічні сили також можуть виступати в якості сторонніх сил, а МГД-генератори ілюструють застосування електродинамічних сил в якості сторонніх.

ЕРС індукції доцільно розглядати окремо від ЕРС. Розглянемо лише спосіб одержання ЕРС індукції при нерухомому контурі та змінному магнітному потоці, що пронизує контур.

В підручнику [9, 10] сказано, що під час зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром, у контурі з'являються сторонні сили, що породжують ЕРС індукції. Відношення роботи з переміщення заряду по замкненому шляху в індукційному електричному полі до заряду переміщеної частинки називають ЕРС індукції.

ЕРС індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку через площу, обмежену замкнутим контуром:

$$\varepsilon_i = k \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Цей вираз є записом основного закону електромагнітної індукції (закону Фарадея). Закон електромагнітної індукції формулюється саме для ЕРС індукції, а не для індукційного струму. Він виражає той факт, що ЕРС індукції не залежить від наявності провідника. Для виникнення індукційного струму необхідним є замкнений провідник. Сила цього струму залежить не тільки від швидкості зміни магнітного потоку, а й від властивостей провідника. ЕРС індукції є кількісною характеристикою вихрового індукційного поля.

Р.В. Поль [18, 117] пропонує застосувати закон електромагнітної індукції до мисленого експерименту: «...індукційна котушка, що складається з одного незамкнутого витка довільної форми, охоплює змінне магнітне поле. Тоді між кінцями дротяної петлі можна спостерігати напругу. Це можна тлумачити так: провідник, тобто дротяна петля, є чимось несуттєвим та побічним. По суті процес абсолютно не залежить від присутності дротяного витка. Суть його в тому, що навколо змінного магнітного поля виникають замкнені лінії електричного поля. Таким чином виток дроту – це лиш індикатор для виявлення наявності електричного поля».

У схожий спосіб автори [3, 243] показують, що при зміні магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром, в останньому виникають сторонні сили, дія яких характеризується ЕРС, що називається ЕРС індукції. Ці сторонні сили пов'язані з вихровим електричним полем і робота вихрового електричного поля при переміщенні одиничного позитивного заряду вздовж замкнутого нерухомого провідника чисельно дорівнює ЕРС індукції в цьому провіднику:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

В [13, 141] даються рекомендації щодо визначення напрямку індукційного струму у витку (правило Ленца); при цьому звертається увага на те, що

магнітний потік, що пронизує контур витка, змінюється, і пропонується пов'язати зміну цього потоку з напрямком індукційного струму.

Розглянемо різні означення поняття «контур». Автори підручників фізики [10, 244], [11, 207], [12, 276] вживають цей термін, проте не означають його.

А.Г. Зільберман [14, 327] підкреслює, що якщо контур провідний, ЕРС викликає в ньому індукційний струм; якщо ж він не проводить струму (наприклад, умовно проведений в повітрі), то виникає лише ЕРС індукції.

Аналіз вказаних джерел дає можливість зробити висновок, що ЕРС індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку. Вона дорівнює роботі сторонніх сил:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\oint_l E'_i dl,$$

де  $E'$  – напруженість поля сторонніх сил.

Якщо виходити з того, що остання формула виражає кількісний зв'язок між змінним магнітним полем ( $B$ ) та вихровим електричним полем ( $E$ ) [12, 277], то можна зробити висновок, що ЕРС індукції залежить від властивостей речовини, в якій є змінне магнітне поле. Зокрема, для котушки:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}, \text{ де } L = \mu\mu_0 n^2 l S.$$

Найбільш чітко це питання розглянуто в [15, 5]. Провідник у вигляді витка вміщується в змінне магнітне поле. Тоді повний магнітний потік, що пронизує цей контур, виходячи з принципу суперпозиції магнітних полів, складається з потоку зовнішнього магнітного поля  $\Phi_{зов}$  і власного магнітного потоку  $\Phi_{влас}$ :

$$\Phi = \Phi_{зов} + \Phi_{влас}.$$

При цьому зовнішній магнітний потік  $\Phi_{зов}$  може змінюватись з часом як в результаті зміни зовнішнього магнітного поля з часом (в кожній точці поля індукція зовнішнього магнітного поля залежить від часу), так і в результаті руху контуру або його частин.

ЕРС індукції виникає незалежно від причин зміни магнітного потоку через контур.

З урахуванням того, що повний магнітний потік дорівнює алгебраїчній сумі потоків зовнішнього магнітного поля та поля, що створюється при проходженні індукційного струму через провідний контур, і залежить від індуктивності контуру, ЕРС індукції запишеться:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_{зов}}{dt} - \frac{d\Phi_{влас}}{dt}.$$

Доданок  $-\frac{d\Phi_{зов}}{dt}$  є ЕРС індукції, що виникає завдяки зміні зовнішнього магнітного поля. Доданок  $\varepsilon_c = -\frac{d\Phi_{влас}}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L \frac{dI}{dt} - I \frac{dL}{dt}$  називається

ЕРС самоіндукції, тому що він виникає завдяки зміні з часом власного магнітного потоку через контур. Зміна власного магнітного потоку може відбуватися як за рахунок зміни струму, так за рахунок індуктивності контуру.

Якщо індуктивність є сталою з часом величиною, то:

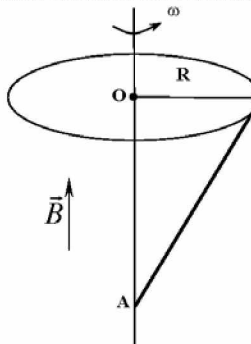
$$\varepsilon_{ci} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Якщо контур складається з одного витка, то другим доданком нехтують.

Одним з критеріїв для оцінки ролі індуктивності може служити порівняння величин зовнішнього магнітного поля і власного поля контуру, а точніше порівняння змін величин цих полів за час спостереження. Такий підхід до вивчення ЕРС індукції дає більш позитивні результати у розумінні фізичної суті цього явища, бо саме перший доданок дає ЕРС індукції, а другий – ЕРС самоіндукції.

Автор [17, 63] вважає, що в законі Фарадея треба враховувати повний потік магнітної індукції, який визначається не тільки зовнішнім полем, але і полем власного струму – струму самоіндукції. Тобто ЕРС індукції є і тоді, коли немає ніякого провідника, а при наявності його виникає індукційний струм, що утворює власне магнітне поле, яке викличе появу струму самоіндукції.

До питання про залежність ЕРС індукції від властивостей контуру, автори задач та вправ звертаються досить рідко. Так, в [16, 22] є таке питання: «Що можна сказати про індукційне електричне поле та індукційний струм у двох кільцях – дерев'яному і мідному, якщо вони пронизуються однаковим змінним магнітним потоком?»



Автор [15] пропонує таку задачу. Металевий стержень AC одним кінцем (точка A) шарнірно закріплений на вертикальному діелектричному стержні АО. Другий кінець (точка C) зв'язаний з вертикальним стержнем за допомогою нерозтяжної непровідної нитки ОС довжиною  $R = 1$  м. Стержень AC обертається навколо стержня АО в однорідному магнітному полі, індукція якого вертикальна і рівна  $B = 10^{-2}$  Тл. Кутова швидкість стержня AC  $\omega = 60$  рад/с. Визначити різницю потенціалів (за модулем) між точками A і C.

*Розв'язання:*

Стержень AC та відрізок OC перетинають за одиницю часу одну й ту саму кількість силових ліній. Тому ЕРС в стержні AC дорівнює ЕРС в ОС.

Можна показати, що  $\varepsilon = \frac{B\omega R^2}{2}$ .

Дійсно, за малий відрізок часу  $\Delta t$  ОС повертається на кут  $\Delta\alpha = \omega\Delta t$  та

може охопити площу

$$\Delta S = \frac{\pi R^2}{2\pi} \Delta\alpha = \frac{\omega R^2}{2} \Delta t.$$

Зміна магнітного потоку  $\Delta\Phi = B\Delta S = \frac{B\omega R^2 \Delta t}{2}$ , звідки

$$\varepsilon = \frac{|\Delta\Phi|}{|\Delta t|} = \frac{B\omega R^2}{2}.$$

Різниця потенціалів:

$$|\varphi_A - \varphi_C| = \varepsilon = \frac{B\omega R^2}{2}.$$

*Відповідь:*  $|\varphi_A - \varphi_C| = \frac{B\omega R^2}{2} = 0,3 \text{ (В)}.$

В розв'язку задачі використано той факт, що ЕРС індукції не залежить від речовини, в якій вона виникає.

Таким чином, немає єдиної точки зору на залежність ЕРС індукції від речовини, в якій вона спостерігається. На наш погляд, слід розглядати ЕРС індукції незалежною від властивостей контуру, як в [9, 10] та [15, 5].

#### Література:

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. – Т. 1. – М.: Мир, 1965. – 258 с.
2. Буховцев Б.Б., Климонтович Ю.Л., Мякишев Г.А. Физика 9. – М.: Просвещение, 1986. – 271 с.
3. Эллиот Л., Уилкокс У. Физика. – М.: Физматлит, 1963. – 807 с.
4. Бугайов О.І., Гонтарук М.М. та інші. Уроки фізики в 9 класі. – К.: Радянська школа, 1977. – 230 с.
5. Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко В.Ф. Фізика 10 клас. – Київ-Ірпінь, 2005. – 307 с.
6. Гримзель Э. Курс физики. – М.: Гос. изд., 1927. – 587 с.
7. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики. – Т. 2. – М.: Наука, 1972. – 730 с.
8. Сусь Б.А., Заболотний В.Ф., Мислицька Н.А. Фізичний зміст електрорушійної сили в мультимедійній інтерпретації // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики. – Т. 2. – Кр. Ріг: НМетАУ, 2005. – С. 319-322.
9. Гончаренко С. У. Фізика 11. – К.: Освіта, 2002. – 319 с.
10. Буховцев Б.Б., Климонтович Ю.Л., Мякишев Г.Я. Физика 9. – М.: Физматгиз, 1962. – 514 с.
11. Марон А.Е., Мякишев Г.Я., Дубицкая Э.Г. Физика 12. – М.: Просвещение, 1990. – 244 с.
12. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1985. – 576 с.

13. Ванєєв А.А., Корж Е.Д., Орехов В.П. Викладання фізики в 9 класі. К.: Радянська школа, 1981. – 153 с.
14. Зильберман Г.Е. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1970 –384 с.
- 15 Чивилев В.И. Физика: задание №4 для 11-х классов. – М.: МФТИ, 2003. – 32 с.
16. Шарко В.Д., Чернявський В. Вивчення теми «Електромагнітна індукція» за модульною технологією. // Фізика та астрономія в школі. – 1999. – №1. – С. 22-37.
17. Зильберман А.Г. Явление самоиндукции. // Квант. – 1990. – №6. – С. 79.
18. Поль Р.В. Учение об электричестве. – М.: Физматгиз, 1962. – 516 с.