

ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Математичні моделі закону електромагнітної індукції, які не урахують обмеження Фарадея, не у повній мірі відповідають фізичному явищу і тому не є законами. Їх неповна відповідність реальним пристроям приводить до "парадоксів": необмеженої величини магнітного поля уніполярних генераторів, нескінченним розмірам індукторів модельованих машин постійного та змінного струму тощо.

Математические модели закона электромагнитной индукции, которые не учитывают ограничения Фарадея, не в полной мере соответствуют физическому явлению и поэтому не являются законами. Их неполное соответствие реальным устройствам приводит к "парадоксам": неограниченной величине магнитного поля уніполярных генераторов, бесконечным размерам индукторов моделируемых машин постоянного и переменного тока и т.д.

"На нас (вчених) лежить обов'язок потурбуватись про розповсюдження і розвиток не лише істинних наукових принципів, але й духу здорового критицизму при розгляді даних, на яких базуються твердження, що здаються науковими".

Дж. К. Максвелл.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасних виданнях [1, 3-6, 14, 16, 17] згідно закону електромагнітної індукції для розрахунку електрорушійної сили (ЕРС) використовується формула, яка зветься "законом Фарадея"

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt}, \quad (1)$$

де $d\Phi_1$ – зміна магнітного потоку контуру, що викликана будь-якою причиною; dt – крок у часі.

Стаття присвячена аналізу фізичних та математичних неузгодженостей, які впливають з формули (1):

1. Формула (1) не у повній мірі відповідає фізичним умовам створення ЕРС за Фарадеєм, бо стосовно її в [1, 3-6, 14, 16, 17] не згадується основне лінгвістичне обмеження, яке сформулював Фарадей – ЕРС створюється при перетинанні провідниками контуру магнітних силових ліній.

2. Наведена в [1, 3-6, 14, 16, 17] формула (1) насправді суперечить деяким експериментам [12, с. 83-86].

3. Для уніполярного генератора з формули

$$e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = E = \text{const} \quad (2)$$

отримуємо відомий "парадокс" зростання у часі до нескінченності магнітного потоку Φ_2 .

4. "Закон Фарадея" (1) прямо суперечить експерименту, проведеному Фарадеєм у 1831 р. на "диску Фарадея" (уніполярному генераторі, у якому мідний диск обертався у магнітному полі постійного магніту), бо в цій машині при дотриманні рівності (2) магнітний потік у "диску Фарадея" є мінімальним і не змінюється у часі ($\Phi_2 \approx 0 = \text{const}$).

5. При $d\Phi_1 > 0$ та $dt > 0$ є математичним "парадоксом" отримання з формули (1) значення $e_1 = 0$, що спостерігається у деяких експериментах [12, с. 83-86].

6. При зміні часу у межах $t = 0 \dots \infty$ і дотриманні рівності (2) таким же математичним "парадоксом" є отримання для уніполярної машини $\Phi_2 \approx 0 = \text{const}$, бо у математиці "такого не буває".

МЕТА

Метою роботи є розгляд на макрорівні відповідності математичних моделей закону електромагнітної

індукції Фарадея реальним пристроям і доведення того, що всі моделі є тотожностями при урахуванні лінгвістичних обмежень Фарадея (необхідність пересічення безперервних магнітних силових ліній провідниками контуру, обмеженість величини магнітного поля реальних пристроїв).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Фарадей у 1831 р. сформулював закон електромагнітної індукції у вигляді твердження "Заряд Δq , який пройшов по замкненому колу, є пропорційним зміні магнітного поля $\Delta\Phi$ і є зворотно пропорційним опору кола R ", тобто

$$\Delta q = -\frac{\Delta\Phi}{R}. \quad (3)$$

Уніполярний генератор (рис. 1) був створений Фарадеєм у 1831 р. для демонстрації наведення ЕРС і складався з постійного магніту 1 та мідного диску 2, що обертався між полюсами N та S магніту 1 [15].

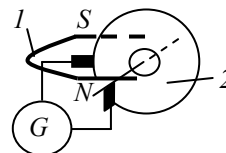


Рис. 1. Генератор Фарадея

ЕРС знімалась щітками і вимірювалась гальванометром G .

Фарадей ввів поняття магнітного поля Φ та його зміни $\Delta\Phi$, створив "мову" магнітних силових ліній і прийшов до висновку, що вирішальною умовою виникнення індукційних струмів є пересічення провідником магнітних силових ліній.

З формули Фарадея (3) випливає закон Ома $I = U/R$, де I – струм; U – напруга, а також дві раніше найбільш розповсюджені у фаховій літературі 1950-1980 років формули для розрахунку ЕРС згідно закону електромагнітної індукції, яких ми далі будемо дотримуватись:

1. Закон у формулюванні Фарадея [2]

$$e_2 = BL_{\Pi}V, \quad (4)$$

де e_2 – ЕРС; B – модуль (абсолютна величина) магнітної індукції; L_{Π} – довжина провідника; V – модуль швидкості руху провідника у напрямку, перпендику-

лярному довжині L_{Π} , який урахує перетинання провідником магнітних силових ліній.

2. Закон у формулюванні Максвелла [2, 14]

$$e_3 = -\frac{d\Phi_3}{dt}, \quad \text{rot}E_3 = -\frac{\partial B_3}{\partial t}, \quad (5)$$

де $d\Phi_3$ – зміна магнітного потоку контуру, що викликана будь-якою причиною; E_3 – напруженість електричного поля; B_3 – магнітна індукція.

Тут формула (5) співпадає за змістом з формулою (1), але наведена окремо із-за різниці у назві. Це демонструє додатковий напрямок суперечностей у застосуванні закону електромагнітної індукції.

Аналітичну форму закону (4) можна перетворити на диференціальну форму (5). Для цього добуток $\Delta S = L_{\Pi} V$ в формулі (4) розглядають як деяку площу ΔS , пройдену у магнітному полі провідником за одиницю часу, а величину $e_2 = \Delta \Phi = B \Delta S$ розглядають як зміну кількості магнітних силових ліній магнітного поля контуру за одиницю часу.

В.Ф. Миткевич [12] розрізняв:

- закон Фарадея:

$$e_4 = -\frac{d\Phi_4}{dt}, \quad (6)$$

де Φ_4 – кількість пересічених провідниками контуру магнітних силових ліній;

- і закон Максвелла (5). Він стверджував, що формула (6) ближче до суті фізичного процесу і є стабільно універсальною у порівнянні з формулюванням Максвелла (5).

В.Ф. Миткевич дав опис ряду експериментів для доведення, що, на протиположності закону Максвелла (5), закон Фарадея (6) працює завжди. Один з цих прикладів необхідності перетинання магнітних силових ліній провідниками контуру для отримання ЕРС приведений на рис. 2 (експеримент виконаний В.Ф. Миткевичем у 1901 р. [12, с. 83]). По первинній обмотці трансформатора w_1 протікає постійний струм і створює у магнітопроводі постійний магнітний потік Φ_5 . Один виток вторинної обмотки $w_2 = 1$ з включеним у нього гальванометром G при ковзанні по електропровідному "кільцю" "стрибком" змінює свій магнітний потік з нуля на Φ_5 . Але при цьому за законом Максвелла (5) ЕРС не створюється, і для витка w_2 ми маємо співвідношення

$$e_5 = -\frac{d\Phi_5}{dt} = 0, \quad (7)$$

де Φ_5 – магнітний потік, отриманий контуром обмотки $w_2 = 1$ рис. 2 без пересічення провідником контуру магнітних силових ліній (в той же час контрольне увімкнення та вимкнення обмотки w_1 наводить ЕРС в обмотці w_2).

Електропровідне "кільце"

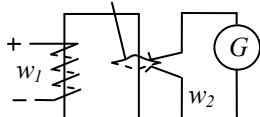


Рис. 2. Дослід В.Ф. Миткевича (1901)

В.Ф. Миткевич також стверджував, що в уніполярних машинах ми зустрічаємось із захованою комутацією (тобто вважав, що по провідниках приховано протікає змінний струм) [12].

Але проведений пізніше дослід уніполярного генератора з ізованим провідником на роторі (рис. 3 [7]) довів, що "захованої комутації" не існує, а у замкненому контурі можна нескінченно довго наводити постійну ЕРС без зростання модуля магнітного потоку контуру до нескінченності.

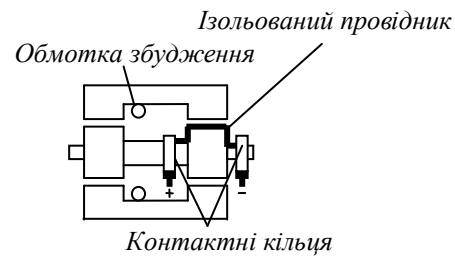


Рис. 3. Уніполярний генератор

Для аналізу процесу створення ЕРС є зручними уніполярні генератори періодичних імпульсів, перші з яких були побудовані у 30-х роках [13].

Схема обмотки уніполярного генератора прямокутних імпульсів постійного струму наведена на рис. 4,а [8, 9].

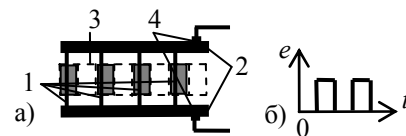


Рис. 4. Схема обмотки генератора уніполярних імпульсів

Початки та кінці провідників 1 на циліндричному роторі уніполярного генератора барабанного типу увімкнені до своїх контактних кілець 2, а уніполярний полюс статора 3 є зубчастим і вміщує однакові однакоїменні полюси, які рівномірно розміщені по колу статора. Ці зубці-полюси статора виділені сірим фоном. Між циліндричним ротором та зубцями-полюсами статора передбачений мінімальний повітряний проміжок, який у ділянці між полюсами статора різко зростає. Провідники 1 циліндричного ротору з'єднані паралельно. За формулою (4) у кожному провіднику 1 генеруються однакові прямокутні імпульси ЕРС однакового напрямку, які спадають майже до нуля, коли провідники попадають у ділянку між полюсами (рис. 4,б).

Уніполярний генератор прямокутних імпульсів ЕРС змінних напрямків Менде Ф.Ф. наведений на рис. 5,а,б [11].

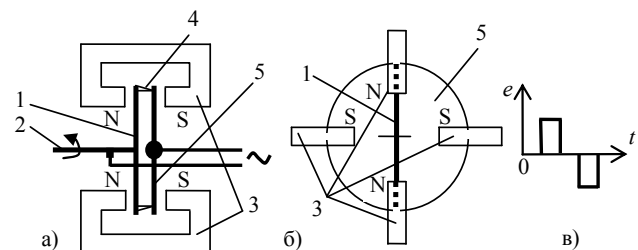


Рис. 5. Багатополюсний уніполярний генератор змінного струму Менде Ф.Ф.

Провідник 1 обертається на валу 2 у магнітному полі магнітів статора 3 і має ковзний контакт 4 з нерухомою електропровідною пластиною 5. У кожного су-

сіднього магніту спрямування магнітного поля є протилежним. Кількість магнітів дорівнює подвоєній кількості провідників. За формулою (4) генератор генерує у провіднику 1 прямокутні імпульси ЕРС, які спадають майже до нуля, коли провідник попадає у ділянку між полюсами. При обертанні провідника 1 змінна ЕРС у формі рис.5,в знімається з центру нерухомої електропровідної пластини 5 та з валу 2 провідника 1.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Максвелл виклав ідеї Фарадея математично у 1860-х роках, скромно вказавши, що він всього лише ці ідеї "одягнув у вишукану математичну одягу". Тим самим всі лінгвістичні умови створення ЕРС Фарадея визнані Максвеллом базисом і основою створеної ним "математичної одяги" і повинні завжди урахувуватись при використанні моделей (5).

1. Повторення дослідів Фарадея. Автор повторив дослід Фарадея (рис. 1) з урахуванням схеми рис. 3 у дисковому варіанті (рис. 6).

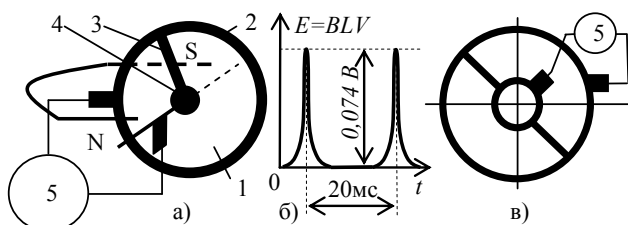


Рис. 6. Принцип роботи уніполярного імпульсного генератора постійного струму: а – схема виконання дослідів; б – форма отриманих осцилограм; в – змінена обмотка ротору

Експериментальний уніполярний генератор (рис. 6,а) складається з постійного магніту, між полюсами якого N та S обертається диск 1 з односторонньої друкованої плати з фольгованого склотекстоліту завтовшки 1,5 мм, на якій витравлені верхня доріжка для щітки 2, активний провідник 3 (у ньому наводиться ЕРС) та нижня доріжка для щітки 4. За допомогою щіток ЕРС активного провідника 3 вимірюється осцилографом 5. Магнітна система генератора виконана із залізної шини з перерізом 30×4 мм, яка створює у робочому повітряному проміжку машини вузький магнітний полюс шириною 4 мм та довжиною 50 мм вздовж радіусу ротора. Двигун, який з незмінною швидкістю обертає диск 1, не показаний.

При обертанні диска 1 у провіднику 3 (рис. 6,а) наводиться позитивно спрямовані імпульси постійної ЕРС з амплітудою 0,074 В. Форма імпульсів ЕРС наведена на рис. 6,б.

Подальші досліді показали:

- якщо замінити диск 1 рис. 6,а на диск з не витравленим мідним покриттям (аналогічно генератору Фарадея, рис. 1), то створюється "режим короткого замикання" для генерованої ЕРС з протіканням змінних вихрових струмів по електропровідному мідному покриттю дискового ротору. В результаті отримуємо постійну (не імпульсну) напругу 0,016 В, яка є меншою в 4,6 рази порівняно з амплітудою ЕРС 0,074 В по схемі рис. 6,а, що взята за еталон. Якщо зміщувати щітки з-під полюсів магніту вздовж зовнішнього краю не витравленого електропровідного диску, то ця постійна напруга поступово зменшується практично до нуля;

- якщо в машині рис. 6,а використати ротор з двома провідниками (рис. 6,в), то частота імпульсів збільшується вдвічі, а амплітуда напруги 0,05 В стає у 1,5 рази менше порівняно з амплітудою ЕРС 0,074 В по схемі рис. 6,а. Напруга зростає у порівнянні з невитравленим ротором із-за збільшення активного опору для вихрових струмів. При іспиті ротора рис. 6,в дві амплітуди напруги, які створювали два активних провідника, відрізнялись між собою на 15 % із-за різниці їх активних опорів;

- додання до схеми рис. 6,а нового магніту, зсунутого на деякий кут відносно першого магніту, з протилежним напрямком магнітної індукції, призводить до отримання на виході ЕРС зі змінними напрямками імпульсів.

З дослідних даних рис. 6 випливає:

1. Напрямок ЕРС залежить від напрямку магнітної індукції полюса.

2. Згідно формули (2) з рис. 6,б впливає відомий "парадокс": магнітні силові лінії лише входять у робочий контур з навантаженням і поступово збільшують його магнітний потік до нескінченності.

3. Наведення ЕРС в контурі рис. 1 відбувається лише у вузькому "робочому провіднику-секторі" диску, коли він пересікає магнітне поле. В усіх провідниках-секторах, які розміщені зовні дії магнітного поля статора, ЕРС не наводиться, і вони є додатковим навантаженням активно-індуктивного характеру для "робочого сектору".

4. З рис. 6,а та рис. 1 випливає, що провідники контуру вимірювання ЕРС можна розмістити таким чином, щоб його магнітний потік $\Phi \approx 0$.

5. Не підтверджується висновок [12], що в уніполярній машині відбувається "захована комутація", бо не можна розглядати мідний диск як механічний перемикач з функціями випрямляча.

2. Можливі конструкції дискового уніполярного генератора. Можна розробити багатополосні імпульсні уніполярні генератори з одним ізольованим активним провідником на роторі дискового (рис. 7) та барабанного (рис. 8) типів з довільним розміщенням полюсів N та S постійних магнітів, які за один період обертання ротору можуть створювати довільну послідовність імпульсів ЕРС заданої довільної форми та спрямування.

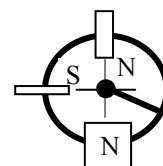


Рис. 7. Багатополосний уніполярний генератор дискового типу

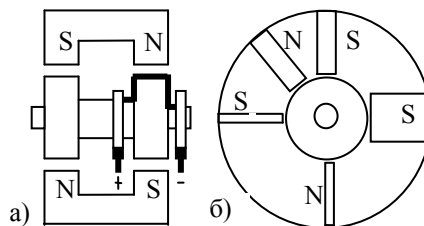


Рис. 8. Багатополосний уніполярний генератор барабанного типу: а – поперечний переріз; б – вид збоку

На рис. 9, як приклад, показані можливі схеми багатополюсних уніполярних генераторів дискового типу та можливі вихідні імпульси ЕРС, разом з якими

наведені позначення відповідних полюсів.

Очевидно, що схеми рис. 9 можуть бути використані в уніполярних генераторах барабанного типу.

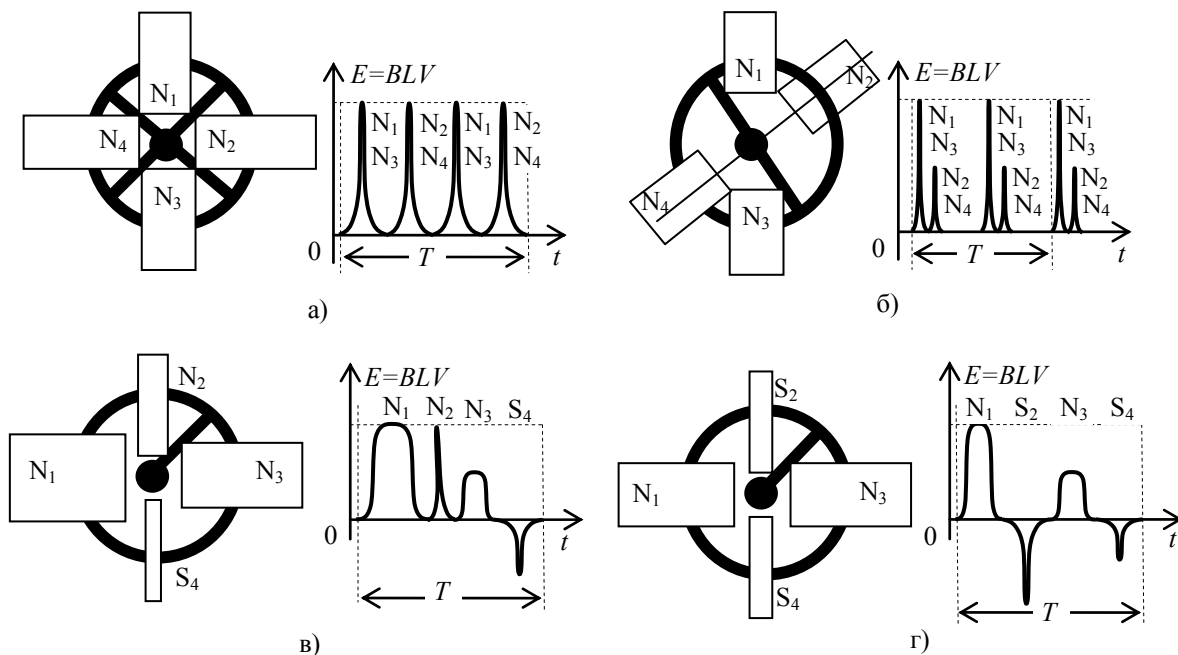


Рис. 9. Можливі конструкції багатополюсного уніполярного генератора дискового типу

3. Вірність відображення реального об'єкта математичними моделями закону Фарадея.

Всі без винятку відомі математичні моделі закону електромагнітної індукції Фарадея (1), (2), (5), (6) описують не реальний пристрій Фарадея у вигляді рис. 1, а деякий умовний реально не існуючий "фізичний об'єкт", який має у природі не існуючу властивість: індуктор статора, у магнітному полі якого рухається провідник, може бути нескінченно великим у просторі, і тому для уніполярних машин це означає нескінченно велике магнітне поле.

На основі формули "закону Фарадея" (1) цей умовний "фізичний об'єкт" для уніполярного генератора постійного струму та уніполярного синхронного генератора можна відобразити у вигляді рис. 10.

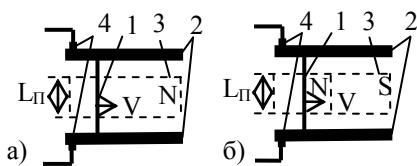


Рис. 10. "Фізичний об'єкт" згідно рівняння (1) для уніполярних генераторів: а – постійного струму; б – синхронного

Тут термін "уніполярний синхронний генератор" використовується умовно – для підкреслення уніполярного характеру наведення змінної синусоїдальної ЕРС і уникнення порівняння із звичайним синхронним генератором. Крім формули (1) ЕРС в обох генераторах рис. 10 можна розрахувати і згідно формули (4): провідники 1 довжиною L_{Π} електрично з'єднані з електропровідними шинами 2 (кільцями) і сумісно з ними рухаються зі швидкістю V у нерухомому магнітному полі індуктора 3 з полюсами N та S при величині магнітної індукції B . Нерухомі щітки

ковзання 4 дозволяють передавати ЕРС на навантаження, яке не показано.

Взагалі всі без винятку відомі математичні моделі закону електромагнітної індукції Фарадея (1), (2), (5), (6) без сумніву мають всі ознаки скінченності величини магнітного поля: якщо скінчилось перетинання магнітних силових ліній провідником, то ЕРС не створюється. Очевидно, що і Максвелл підтримувався цих поглядів, бо він дав ідеям Фарадея "лише математичну одягу" – зовнішнє математичне оформлення, а ідеї (опис процесів) належать Фарадею.

У великого Фарадея немає жодних парадоксів в уніполярному генераторі рис. 1. Парадокс полягає у нашому невірному мисленні: чому при переході від алгебраїчної форми розрахунку ЕРС (4) до диференційної форми (5) ми вважаємо цілком природним інтегрувати отримане диференційне рівняння до нескінченності у часі і просторі, а не за Фарадеєм – до реального закінчення пересічення всіх магнітних силових ліній полюсу? Адже ця нескінченність у часі означає нескінченно великі розміри індукторів як уніполярних машин так і машин змінного струму. Чому ми надали магнітному полю уніполярного генератора у природі не існуючу необмежену величину, а потім, при нами ж введеному не обмеженому у часі інтегруванні у цьому магнітному полі, жахасємось, що магнітне поле виявляється нескінченно великим (і звемо це парадоксом)? І разом з тим чомусь ми не звемо парадоксом можливість нескінченного інтегрування у часі магнітного поля машини змінного струму лише тому, що величина магнітного потоку математичної моделі відображує реальність.

Безумовно, що подібна модель рис. 10 є фізично невірною. Вона може бути виправдана лише своєю зручністю: для машин постійного та змінного струмів отримуються адекватні вихідні результати у часі з

теоретичною можливістю зміни у часі всіх складових математичної моделі при урахуванні взаємодії компонентів складної системи керування.

Ні Фарадей за формулою (4), ні Максвелл за формулою (5), ні сучасні автори [1, 3, 4, 5, 14, 16, 17] безумовно не розглядали процес зростання до нескінченності модуля магнітного поля в уніполярних машинах (хоча це й прямо впливає з використаних виразів). Хоча по суті всі вони при розгляді створення ЕРС мають на увазі швидкість зміни магнітного поля у часі з перетином магнітних силових ліній провідниками контуру за Фарадеєм при обмежених розмірах індуктора, але проблема існування парадоксу зростання до нескінченності магнітного поля уніполярного генератора [10] вимагає відповідного відображення математичних моделей.

Можна вважати, що всі без винятку відомі математичні моделі закону електромагнітної індукції Фарадея (1), (2), (5), (6) є тотожними і "працюють" вірно завжди, коли урахується лінгвістичне обмеження – вимога Фарадея стосовно перетинання провідниками безперервних магнітних силових ліній з урахуванням обмеженості величини магнітного потоку реальних пристроїв і "не працюють", коли ця вимога не задовольняється.

Обов'язок перевірки власної математичної моделі стосовно дотримання умов Фарадея лежить на самому досліднику.

Треба визнати, що з початкового лінгвістичного формулювання Фарадея, якому відповідає формула (3), можна вивести формулу (1). Але формула (1), як частка "вишуканої математичної одяжі теорії Фарадея" все ж була отримана саме Максвеллом і є складовою його системи рівнянь. Чомусь "закон Ома" не змінив своєї назви, хоча цей закон теж впливає з того ж лінгвістичного формулювання Фарадея. Тому, на наш погляд, два закони електромагнітної індукції у формулюванні Фарадея (4) та у формулюванні Максвелла (5) [2] (з відповідними лінгвістичними обмеженнями Фарадея) все ж більш точно передають у історичному сенсі роботу, виконану двома геніями. Великий Фарадей, який за життя пізнав чимало образ людської гідності, назавжди залишиться у пам'яті людства як символ джерела для океану електричної енергії, у якому зараз ми "купаємось". І немає потреби для нашої зручності приписувати йому формулу (1), бо ця формула без відповідних обмежень Фарадея не є законом: вона не завжди підтверджується експериментами [12], а на додаток прямо суперечить досліду самого Фарадея, бо приводить до розглянутих нами парадоксів.

4. Коректність математичних перетворень.

Ми звикли до того, що математика завжди вірно відображує фізичні явища. Тому корисно з цього боку розглянути деякі сторони математичного аналізу електромагнітних процесів.

4.1. Припустимо, що в схемі рис. 2 ми використали не один трансформатор, а їх велику кількість при можливості збільшувати чи зменшувати магнітний потік робочого контуру гальванометра G . Така фізична схема буде виконувати операцію математичного диференціювання та інтегрування магнітного потоку контуру гальванометра G , і її робота стосовно зміни

магнітного поля контуру не відрізняється від результатів роботи схеми уніполярних генераторів рис. 10. Невідповідність полягає лише в тому, що уніполярні генератори рис. 10 генерують ЕРС, а схема рис. 2 – ні.

Цю невідповідність фізичним процесам для закону електромагнітної індукції Фарадея можна усунути, наприклад, використанням математичної моделі у вигляді

$$e_6 = -P \frac{d\Phi_6}{dt}, \quad (8)$$

де P – перемикаюча функція, яка приймає значення 1 при виконанні умов Фарадея (пересічення провідником безперервних магнітних силових ліній і фізична обмеженість площі магнітного поля) та приймає значення 0 в іншому випадку.

Формула (8) є більш коректною і нагадує, що ми маємо справу з математичними виразами з обмеженнями.

Вона усуває всі розглянуті нами парадокси, змушує дослідника до перевірки всіх умов теорії Фарадея у досліді, дозволяє вірно визначити інтегральну величину магнітного поля.

4.2. Система рівнянь Максвелла теж повинна ураховувати обмеження Фарадея, наприклад, перемикаючою функцією P :

$$\text{rot}E = -P \frac{\partial B}{\partial t}; \quad \text{rot}H = j + \frac{\partial D}{\partial t}; \quad \text{div}D = \rho; \quad \text{div}B = 0, \quad (9)$$

де E – напруженість електричного поля; B – магнітна індукція; H – напруженість магнітного поля; j – щільність електричного струму, викликаного рухом зарядів; D – електрична індукція; ρ – щільність електричного заряду.

Перше рівняння є законом індукції Фарадея; друге рівняння відображує залежність вихрового магнітного поля від щільності електричного струму та зміни електричної індукції; третє рівняння є еквівалентом закону Кулона (електричний заряд є джерелом електричної індукції); четверте рівняння стверджує, що немає інших джерел магнітного поля, крім струмів (магнітних зарядів не існує) [14].

4.3. Згідно математичних канонів диференційного та інтегрального числення не може існувати будь-який реальний об'єкт, робота якого описується математичним рівнянням $e_4 = -d\Phi_4/dt \neq 0$ і для якого $dt > 0$, а $d\Phi_4 = 0$ та $\Phi_4 = 0$. Але уніполярний генератор саме цим вимогам і відповідає, бо магнітний потік уніполярного генератора є мінімальним і не змінюється. З математичної точки зору це пояснюється тим, що для робочого контуру ми розглядаємо диференційні рівняння з лінгвістичними умовами, які відрізняються від рівнянь без лінгвістичних обмежень.

Згідно з даними рис. 6,а при використанні диску з не витравленим мідним покриттям (аналогічно генератору Фарадея рис. 1) все мідне покриття ротору можна умовно розділити на окремі сектори. Робочий провідник ротору у вигляді такого сектору при розміщенні в магнітному полі індуктора створює ЕРС, але водночас при цьому ж переміщенні він виходить з цієї ділянки (тобто "розриває" контур, не є провідником даного конкретного контуру, в якому він заміщується іншим провідником) і перетворюється для ново-

го робочого контуру на "навантаження" (яке може мати і власну ЕРС). В результаті ЕРС наводиться, хоча магнітний потік робочого контуру не змінюється. Ця фізична особливість по створенню ЕРС уніполярним генератором ураховується у вигляді умови, при дотриманні якої перемикаюча функція в рівняннях (8) та (9) дорівнює 1.

4.4. Результати роботи *фізичних об'єктів* (рис. 10 з одного боку та рис. 2 з іншого боку) підтверджують *вірність математичних вимог щодо урахування для однакових на вигляд формул методу (алгоритму, умов, шляху) їх отримання*, що в даному конкретному випадку не виконується у фахових виданнях.

ВИСНОВКИ

1. Математична модель закону електромагнітної індукції без лінгвістичних обмежень Фарадея *не є законом*, може дати невірний розв'язок і привести до фізичних та математичних парадоксів.

2. Всі математичні моделі закону електромагнітної індукції Фарадея, включаючи формулу Максвелла, є тотожностями і повинні або безпосередньо відображувати обмеження Фарадея стосовно умов існування явища електромагнітної індукції, або супроводжуватись лінгвістичними вимогами щодо їх дотримання.

3. Відомий "парадокс" у вигляді нескінченної величини робочого магнітного поля уніполярних машин розповсюджується на всі існуючі електричні машини постійного та змінного струмів і пояснюється тим, що математичні моделі закону Фарадея відображують зручну для аналізу, але не існуючу у дійсності для реальних машин можливість мати нескінченно великий індуктор.

4. Експериментально підтверджено, що в уніполярному генераторі створюється постійна ЕРС без захованої комутації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: Навчальний посібник: у 2 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001. – 448 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
3. Гончаренко С.У. Фізика: Довідкові матеріали для абітурієнтів. – К.: Либідь, 1996. – 208 с.
4. Дмитрієва В.Ф. Фізика: Навч. посіб. – К.: Техніка, 2008. – 648 с.
5. Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романішин Б.М. та ін. Курс фізики: Навчальний підручник. – Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2002. – 376 с.
6. Крыжановский В.Г. Физика. Справочник школьника и студента. – Донецк: ООО ПКФ "БАО", 2008. – 464 с.
7. Кутковецкий В.Я., Запорожец Ю.М. Взаимодействие проводника с магнитным полем // Электричество. – 1996. – №9. – С. 60-62.
8. Лившиц А.Л. Униполярный генератор постоянного тока. А.с. СССР №104347, класс 21 d, 6 49m от 28.11.1951 г. – 3 с.
9. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.
10. Менде Ф.Ф. О физических основах униполярной индукции. Новый тип униполярного генератора // Инженерная физика. – 2013. – №6. – С. 7-13.
11. Менде Ф.Ф. Многополюсный униполярный генератор переменного тока. Электронный ресурс

fmnauka.narod.ru/ug.pdf (18.01.2014).

12. Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 258 с.
13. Михайлов-Микulinский М.С. Электромагнитные генераторы периодических импульсов промышленных частот // Электричество. – 1951. – №11. – С. 12-14.
14. Парсел Э. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1975. – 440 с.
15. Фарадей М. Избранные работы по электричеству. – М.-Л.: Гос. объедин. научно-техн. изд-во, 1939. – 304 с.
16. Чолпан П.П. Фізика: Підручник. – Київ: Вища школа, 2004. – 567 с.
17. Энциклопедия для детей. Физика. – Т. 16. – Ч.2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. – М.: Аванта, 2001. – 432 с.

REFERENCES: 1. Bushok G.F., Levandovskiy V.V., Piven G.F. *Kurs fiziki: Navchalniy posibnik: u 2 kn. Kn. 1. Fizichni osnovi mekhaniki. Electrica i magnetism.* Kyiv, Libid Publ., 2001. 448 p. 2. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory.* St.Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p. 3. Goncharenko S.U. *Fizika: Dovidkovi materialy dlya abiturientiv.* Kyiv, Libid Publ., 1996. 208 p. 4. Dmitrieva V.F. *Fizika: Navch. posib.* Kyiv, Tehnika Publ., 2008. 648 p. 5. Zachek I.P., Kravchuk I.M., Romanishin B.M. and others. *Kurs fiziki: navchalniy pidruchnik.* Lviv, Beskid Bit Publ., 2002. 376 p. 6. Krijanovskiy V.G. *Fizika. Spravochnik shkolnika i studenta.* Donetsk, PKF "BAO" Ltd., 2008. 464 p. 7. Kutkovetskiy V.J., Zaporozec Y.M. *Vzaimodeystvie provodnika s magnitnim polem.* *Elektrichestvo – Electricity*, 1996, no.9, pp. 60-62. 8. Livshiz A.L. *Unipolarniy generator postoyannogo toka* [Unipolar DC generator]. Patent USSR, no.104347, 1951, 3 p. 9. Livshiz A.L., Otto M.S. *Impulsnaya electritehnika.* Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 352 p. 10. Mende F.F. O fizicheskikh osnovah unipolarnoi indukcii, *Noviy tip unipolarnogo generatorya. Inzhenernaia fizika – Engineering Physics*, 2013, no.6, pp. 7-13. 11. Mende F.F. *Mnogopolusniy unipolarniy generator peremennogo toka* (Multipole unipolar AC generator) Available at: <http://fmnauka.narod.ru/UG.pdf> (accessed 18 January 2013). 12. Mitkevich V.F. Magnitniy potok i ego preobrazovaniya. Moscow-Leningrad, Acad. of Sci. USSR Publ., 1946. 258 p. 13. Mihaylov-Mikulinskiy M.S. Electromagnitnie generatoryi periodicheskikh impulsov promislennih chastot. *Elektrichestvo – Electricity*, 1951, no.11, pp. 12-14. 14. Parcel E. *Elektrichestvo i magnetism.* Moscow, Nauka Publ., 1975. 440 p. 15. Faraday M. *Izbrannie roboti po elektrichestvu.* Moscow-Leningrad, Gosudarstvennoe ob'edinennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo, 1939. 304 p. 16. Cholpan P.P. *Fizyka.* Kyiv, Vyscha shkola Publ., 2004. 567 p. 17. *Enciklopediya dlya detey. Fizika.* vol.16, part2, *Elektrichestvo i magnetism. Termodinamika i kvantovaya mekhanika. Fizika yadra s elementarnykh chastic.* Moscow, Avanta Publ., 2001. 432 p.

Надійшла 25.01.2014

Кутковецкий Валентин Якович, д.т.н., проф.,
Чорноморський державний університет ім. Петра Могили,
кафедра інформаційних технологій та програмних систем,
54003, Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10,
тел/phone +38 0512 366578, e-mail: kb@kma.mk.ua

V.J. Kutkovetskiy

Petro Mohyla Black Sea State University
10, 68-Desantnykiv Street, Mykolaiv, 54003, Ukraine

The law of electromagnetic induction.

Mathematical models of the electromagnetic induction law which do not take into account Faraday's restrictions are not in full accordance with the physical phenomenon and so they are not laws. Their incomplete correspondence with real devices results in such "paradoxes" as unlimited magnetic field of unipolar generators, infinite sizes of inductors for DC and AC machines modeled, and so on.

Key words – the laws of electromagnetic induction, Faraday, Maxwell.