3. МЕТОДИКА ВИКЛАДАННЯ У ВИЩІЙ ШКОЛІ

Б. М. Валійов, В. Д. Єгоренков, Н. С. Шишко

Класичне джерело змінного струму високої напруги: навчальний експеримент

У статті викладено історію винаходу та побудови котушки Румкорфа, а також пояснення принципу її роботи. Наведено еквівалентну схему такої котушки з електромеханічним переривачем. Викладено розвиток теоретичного опису цього приладу. Описано та показано обладнання для лекційного демонстраційного досліду із такою котушкою. Отримано та наведено осцилограму електричного сигналу, який виробляється у первинному контурі котушки при періодичній роботі електромеханічного переривача. Наведено і обговорено лекційний експеримент «Сходи Якова». Описані досліди дають змогу викладачу поглибити знання студентів щодо старовинних джерел струму.

Ключові слова: змінний струм, джерело, «Сходи Якова»

Описуване нижче джерело змінного струму тепер використовується у практиці досліджень та викладання лише зрідка (там, де воно збереглося в робочому стані), а колись воно було неодмінною приналежністю шкільних та університетських фізичних кабінетів. Але це джерело відіграло певну роль у фізичних дослідженнях минулих років, а застосовані в ньому принципи роботи мають неабияку практичну та методичну цінність. Ми торкнемося принципів роботи цього джерела, яке добре відоме науковій та викладацькій спільноті під назвою «котушка Румкорфа». Зауважимо, що саме котушкою Румкорфа скористався Вільгельм Рентген у своїх дослідженнях, які завершилися відкриттям променів, що були названі його іменем.

Побудова індукційної котушки

Ось переклад Володимира Дмитровича Єгоренкова оригінального тексту М. Фарадея[1,132]: «За допомогою (шматочків) деревного вугілля на кінцях спіралі В можна було спостерігати маленьку іскру, коли контакт батареї сполучався з (точкою) А. Ця іскра не могла бути обумовлена ніяким відгалуженням частини струму батареї крізь осердя до спіралі В, оскільки, коли контакт батареї продовжував підтримуватися, гальванометр все ж відновлював свій абсолютно байдужий стан. Іскра рідко спостерігалася при розриванні контакту. Маленька платинова дротинка не могла бути розжарена цим індукованим струмом; але, здається, є всі підстави вважати, що цей ефект можна було б одержати при використанні сильнішого початкового струму або потужнішої схеми спіралей».

Майкл Фарадей (1791–1867)

Із цього уривка видно, що перший експеримент, у якому ефект високого потенціалу був одержаний у вторинному контурі при включенні чи розриванні первинного контуру, був виконаний Фарадеєм у 1831 році. Це – серія знаменитих експериментів Фарадея, де він відкрив явище електромагнітної індукції. Прилад, використаний Фарадеєм, складався із залізного кільця, на яке були намотані дві котушки мідного дроту, ізольовані одна від одної та від кільця, причому одна з котушок приєднувалася до батареї. Створюючи контакт між батареєю і цією котушкою чи розриваючи його, Фарадей отримував короткі іскри між двома вугільними електродами, якими закінчувалася друга котушка. Він помітив, що іскри утворювалися легше, коли контакт формувався, а не коли він розривався. Пізніше ми побачимо, що контури будь-якої індукційної котушки можна налагодити так, щоб при приєднанні живлення до первинної обмотки у вторинній обмотці утворювався високий потенціал. Звичайно, однак, бажають, щоб високий потенціал створювався при розриві такого контакту.

Хоча Румкорфу часто приписують винахід індукційної котушки, вона була винайдена Ніколасом Калланом у 1836 році.

Ніколас Каллан (1799–1864)

Генріх Даніель Румкорф (1803–1877)

Першу версію своєї котушки Румкорф запатентував у 1851 році, і її успіх був такий, що у 1858 році йому було присуджено премію Наполеона III в розмірі 50 тисяч франків. На рис. 1, запозиченому із французького патенту, зображено схему котушки.

Далі наведемо опис та дію схеми, запозичені із книги [2] (українська орфографія зразка 1936 року!). Один із нас – Володимир Дмитрович Єгоренков – був знайомий із автором цієї корисної книги, відомим у довоєнні та післявоєнні роки харківським інженером Іваном Федотовичем Федотовим, але не знав, що він написав і видав цю книгу українською мовою.

Надамо слово автору книги: «Залізне осердя із відпаленого заліза, складене із окремих листів або дротинок, обмотане порівняно невеликим

числом витків товстого дроту, один кінець якого йде безпосередньо до затискача живлення, а другий прилучається до металічного стояка. Зверх цієї обмотки надівається ебонітова трубка, що ізолює обмотку низького напруження (первинну) від обмотки високого напруження (вторинної). На трубку насаджується вторинна обмотка у вигляді шарів або окремих секцій, сполучених між собою послідовно. Кінці вторинної обмотки підводяться до затискачів високого напруження, в яких укріпляється розрядник Е. До стояка на пружній пластинці укріплений проти кінця осердя шматочок м'якого заліза – якір. На цій пластинці також укріплений контакт. Проти контакта на стояку є регулювальний гвинт V з головкою на одному кінці і контактом – на другому. Конденсатор прилучається до обох стояків. Від стояка іде провід до другого затискача живлення. Батарея елементів або акумуляторів Р (крізь ключ М) прилучається до двох затискачів». Ключ М живить первинну обмотку, осердя намагнічується і притягає якір, внаслідок чого пластина якоря згинається і перериває контакт, струм переривається, осердя відпускає якір, який повертається у вихідне положення, і знову контакт відновлюється. Значне поліпшення було досягнуто у 1853 році Арманом Фізо, який вперше використав разом з переривачем конденсатор.

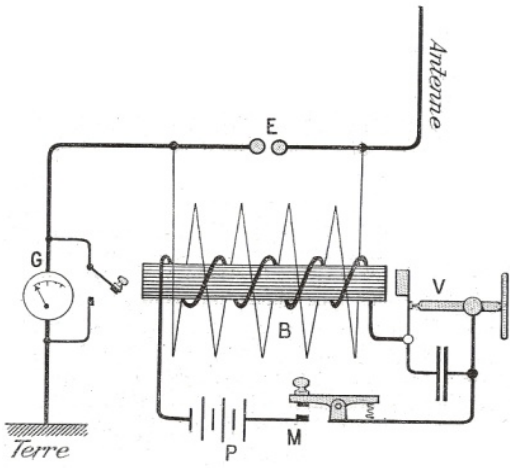

Рис. 1. Схема котушки

Еквівалентна схема

Для цікавих читачів надамо еквівалентну схему нашої (малої) котушки так, як її викладено у книзі [3] (з уніфікованими позначеннями, див. рис. 2).

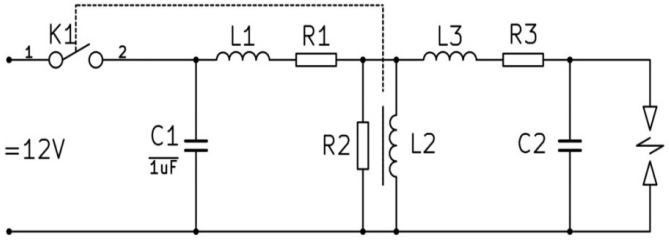

Рис. 2. ***Еквівалентна схема нашої котушки***

K1 – комутатор (переривач); C1 – конденсатор; L1 – індуктивність розсіяння первинної обмотки; R1 – активний опір первинної обмотки; L2 – індуктивність первинної обмотки; R2 – опір втрат трансформатора; L3 – індуктивність розсіяння вторинної обмотки, приведена до первинної обмотки: L3 = L_{s2}/n^2; R3 – активний опір вторинної обмотки, приведений до первинної R3 = r_2/n^2; C2 – власна ємність трансформатора, приведена до первинної обмотки: C2 = $C_{тр.}Чn^2$; n – коефіцієнт трансформації, який дорівнює відношенню числа витків вторинної обмотки W_2 до числа витків первинної

W_1, $n = W_2/W_1$; Ls_2 – індуктивність розсіяння вторинної обмотки; r_2 – активний опір вторинної обмотки; C_{mp} – власна ємність трансформатора.

Теоретичний опис дії котушки

Роберт Андрійович Коллі (1845–1891)

У 1891 році російський фізик Роберт Андрійович Коллі запропонував теорію [4], у якій вторинний потенціал розглядався як такий, що виникає внаслідок суперпозиції двох коливань. Однак він вважав, що ці частоти є резонансними частотами двох окремих контурів. Він знехтував реакцією вторинного струму на первинний, і у своїх експериментах виразно поєднав великі самоіндукції послідовно з первинною обмоткою – таким чином, вторинна обмотка діяла індуктивно тільки на невелику частку первинної обмотки, або, як ми сьогодні кажемо, контури мали дуже слабкий зв'язок. Отже, теорія Коллі застосовна лише до випадку дуже слабкого звязку і не може застосовуватися до індукційної котушки у її звичайному робочому режимі.

Антон Обербек (1846–1900)

Перший детальний розв'язок задачі з урахуванням цього впливу був знайдений А. Обербеком [5]. У нашому викладенні ми наведемо його результат у вигляді, оприлюдненому в книзі [6]. Виявляється, що в цій схемі можливі дві власні частоти коливань. Якщо нехтувати активними опорами, то вираз для цих частот має такий історичний вигляд:

$$8\pi^2 n^2 = \frac{1}{1-k^2}\left[\frac{1}{L_1C_1}+\frac{1}{L_2C_2} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{1}{L_1C_1}-\frac{1}{L_2C_2}\right)^2+\frac{4k^2}{L_1C_1L_2C_2}\right)}\right].$$

Тут n – частота, $k^2=M^2/L_1L_2$, M – коефіцієнт взаємної індукції. Ми позначимо більшу із частот за допомогою n_2, а меншу – n_1. У багатьох обчисленнях зручно представити відношення L_1C_1/L_2C_2 за допомогою одного символу. Позначимо його u, і тоді ми знайдемо для відношення квадратів частот таку оригінальну формулу:

$$\frac{n_2^2}{n_1^2} = \frac{1+u+\sqrt{\left((1-u)^2+4k^2u\right)}}{1+u-\sqrt{\left((1-u)^2+4k^2u\right)}}.$$

Легко перевірити, що це відношення частот найменше, коли $u = 1$.

Джон Стретт, третій барон Релей (1842–1919)

У 1901 році теорію роботи індукційної котушки, яка має переривач і розімкнений вторинний контур, запропонував лорд Релей [7]. Згідно з його теорією, струм у первинній обмотці переривається із достатньою раптовістю, наприклад, коли він переривається кулею із рушниці, тоді конденсатор непотрібний. Ніякий струм не тече у вторинній обмотці, доки стаціонарний постійний струм тече у первинній обмотці, але коли первинний контур замикається і розмикається, у вторинному контурі збуджуються дві електрорушійні сили, спрямовані протилежно, причому та, що збуджується при розмиканні первинного контуру, значно переважає іншу. Звідси випливає необхідність у якомусь переривачі, неперервна дія якого має наслідком низку розрядів від одного вторинного затискача до іншого у формі іскор. Релей вказав, що у момент переривання наявна втрата енергії за винятком випадку, коли немає магнітних втрат між первинним та вторинним контурами, тобто коли $L_1L_2 = M^2$ (k= 1). Він продемонстрував, що при виконанні цієї умови та дуже малому активному опорі вторинного контуру внаслідок закону збереження енергії максимальний потенціал вторинної котушки має вигляд:

$$V_{2m} = i_0\sqrt{\frac{L_1}{C_2}},$$

де i_0 – струм у первинній котушці якраз перед перериванням.

Едвард Тейлор-Джоунз (1872–1961)

З іншого боку, зараз наявна велика кількість експериментальних свідчень про існування двох коливань як у первинному, так і у вторинному контурах, а теорія Релея не враховує коливань у первинному контурі. Далі експеримент Релея з рушницею було повторен Едвардом Тейлор-Джоунзом [6] з відмінним результатом: він знайшов, що істотно довша іскра була отримана з конденсатором, а не без нього, якщо ємність конденсатора відповідно підібрати. Таким чином, виявляється, що теорія Релея, хоча і застосовна у певному граничному випадку, недостатньо широка, щоб охопити дію індукційної котушки в цілому, коли зв’язок між контурами дуже сильний (u близько до одиниці) і коливання у первинному контурі мають важливий вплив на спостережуване явище.

Ми знов використаємо джерело [6]. Згідно з теорією, викладеною там, величина вторинного потенціалу не може перевищувати суму амплітуд двох компонент. Ця сума дорівнює:

$$2\pi L_{21} i_0 \frac{n_1 n_2}{n_2 - n_1}.$$

Розгляньмо, що відбувається в первинному контурі після переривання. У цьому контурі починаються два коливання у одній і тій же фазі. Отже, якщо відношення часто складає 3, 7, 11... , то первинний потенціал у момент, коли потенціал вторинної котушки досягає максимуму, дорівнює різниці амплітуд.

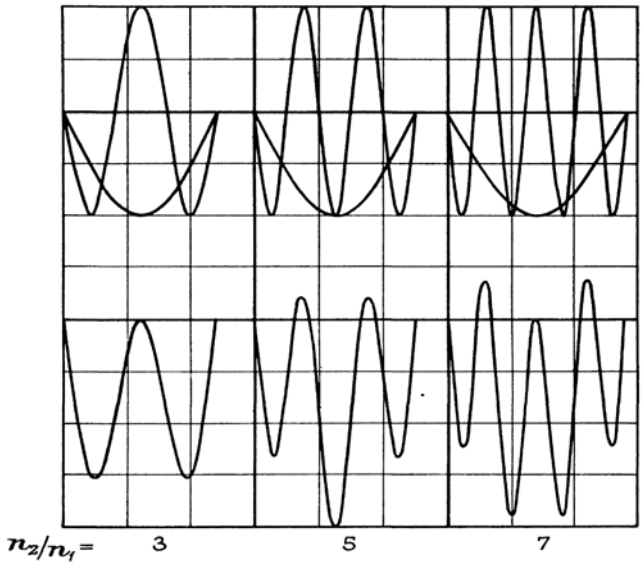

Рис. 3. Коливання у первинній Обмотці індукційної котушки

На рис. 3 верхні криві представляють дві компоненти коливань первинного потенціалу для трьох значень відношень частот, причому амплітуди визначаються умовою $u = 1 - k^2$.

Нижні криві показують результат їхньої суперпозиції. З нижніх кривих видно, що, якщо відношення частот склдає 3 чи 7, первинний потенціал є нуль, і тому конденсатор незаряджений у цей момент часу (чверть періоду повільніших коливань) після переривання. Більш того, криві показують, що не тільки потенціал первинного контуру, але й швидкість його зміни в цей момент часу звертається на нуль, у первинному контурі струму нема.

Експеримент із первинною обмоткою малої індукційної котушки

Фото 1. Схема установки

На фото 1 зображено схему пропонованого нами експерименту з демонстрацією форми сигналу у первинній обмотці малої індукційної котушки. Тут використано (зліва направо) блок живлення, малу котушку Румкорфа, осцилограф).

На фото 2 ми наводимо збільшене зображення екрану осцилографа, де на осцилограмі добре видно момент переривання струму та подальший розвиток подій.

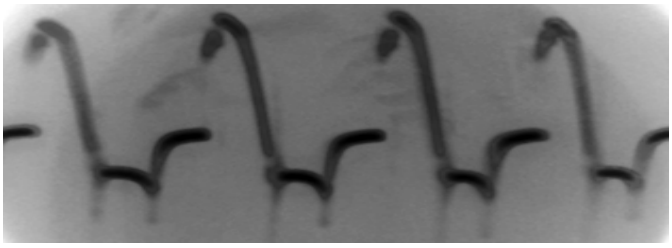

Фото 2. Осцилограма сигналу на первинній обмотці

Велика котушка Румкорфа

На жаль, існує мало відомостей про те, коли і за яких обставин ця котушка (фото 3) потрапила до Харківського університету. Напівлегендарна версія полягає у тому, що Росія ще до революції 1917 року замовила в Німеччині п’ять таких котушок із трансформаторами Тесла у якості другого каскаду високої частоти для здійснення експериментальних радіопередач. Одна з них опинилася у Харківському університеті.

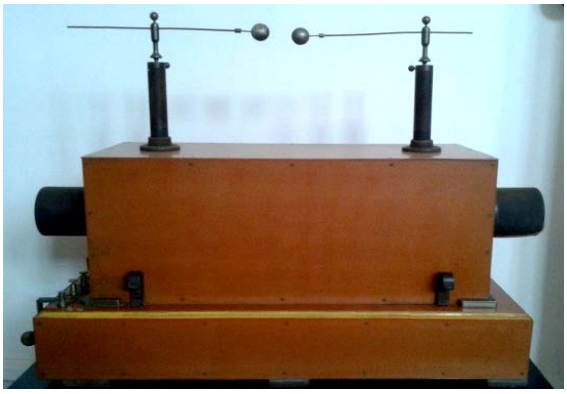

Фото 3. Велика котушка Румкорфа ХНУ імені В. Н. Каразіна

Електролітичний переривач

Наша велика котушка Румкорфа має електролітичний переривач (фото 4), який був незалежно винайдений Симоном та Колдуеллом у 1899 році. У ньому обидва електроди зроблені зі свинцю і мають велику площу, вони вміщені у одну посудину, яка містить 20 % розчин сірчаної кислоти у воді, але сполучаються електроди між собою лише крізь малий отвір у керамічній вставці, яка розташована коаксіально і відокремлює їх одна від одної. У цій симетричній схемі переривання відбувається біля отвору, де переріз провідної рідини найменший. Загальноприйнятне пояснення роботи переривача Симона та Колдуелла (як і переривача Венельта) базується на тому, що переривання струму обумовлене швидким формуванням шару газу (кисню та водяної пари) поблизу отвору (на зразок поляризації електродів при електролізі), який перериває струм із частотою близько 2000 Гц. На відміну від

Фото 4. Переривач Симона (вид зверху)

котушки з електромеханічним переривачем, яка живиться постійним струмом, наша велика котушка живиться змінним струмом у 220 В із звичайної електромережі.

Експеримент із великою котушкою

Нещодавно наша велика котушка Румкорфа, описана вище, була використана для класичного демонстраційного експерименту «Сходи Якова». Команда студентів фізико-технічного факультету нашого університету у 2013 році виборола перше місце у Всеукраїнському турнірі фізиків і отримала можливість представляти Україну на міжнародному турнірі у 2014 році в Лозанні (Швейцарія). У якості одного із домашніх завдань потрібно було зняти відео цього експерименту та вивчити його. Більш розповсюджена мала котушка забезпечувала невеликий струм і не могла бути використана. Команда звернулася до нашої лабораторії, яка працює на фізичному факультеті, де завдяки допомозі одного із авторів – Бориса Михайловича Валійова – та наявності великої котушки вона змогла це зробити. Команда посіла друге місце, поступившись лише представникам Франції.

На фото 5а, б, в, г наведені фото цього експерименту.

Фото 5а

Фото 5б

Фото 5в

Фото 5г

На вищенаведених фото (5 а, б, в, г) – розрядник. Він має форму двох прямих провідників, відстань між якими збільшується знизу вгору. Розрядник підключений до борнів великої котушки. Високовольтний шнуровий розряд запалюється внизу при певній відстані у повітрі (згідно із законом Пашена) і має густину, меншу за густину повітря. Тому він спливає вгору завдяки силі Архімеда. Коли він досягає певної висоти, умова його підтримки порушується, розряд гасне і знов запалюється внизу. Далі процес повторюється.

Отже, ми виклали принцип роботи та метод використання котушки Румкорфа, у двох демонстраційних експериментах. В одному з них продемонстровано характер коливань у первинній обмотці котушки, у другому наведено історичний дослід «Сходи Якова» із використанням великої котушки.

Автори висловлюють глибоку подяку В. В. Нерубенку за ґрунтовну допомогу у реєстрації сигналу в первинній обмотці малої котушки.

Література

1. Faraday M. Experimental Researches in Electricity / Michael Faraday // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1832. – January 1. – Vol. 122. – P. 125–162.

2. Фєдотов І. Ф. Юний електрик-конструктор і експериментатор / І. Ф. Фєдотов. – Х. : ОНТИ-НКТП, Державне науково-технічне видавництво України, 1936.

3. Цыкин Г. С. Трансформаторы низкой частоты / Г. С. Цыкин. – М. : Связьиздат, 1955. – 431 с.

4. Colley R. Zur Theorie des Ruhmkorff'schen Apparates / R. Colley // Annalen der Physik. – 1891. – Vol. 280. – Issue 9. – P. 109–132.

5. Oberbeck A. Ueber den Verlauf der electrischen Schwingungen bei den Tesla'schen Versuchen / A. Oberbeck // Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge. – 1895. – Band 55. – S. 623–632.

6. Taylor Jones E. Induction coil, theory and applications / E. Taylor Jones. – London : Sir Isaac Pitman and sons, Ltd, 1932. – 244 p.

7. Lord Rayleigh. On the Induction-Coil / Lord Rayleigh // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science [Sixth Series]. – 1901, December. – Vol. 2. – Issue 12. – P. 581–594.