

План уроку 70

Тема: Електродинаміка.

Тема уроку: Електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола.

Мета уроку: роз'яснити учням роль сторонніх сил в електричному колі, ознайомити їх із законом Ома для повного кола.

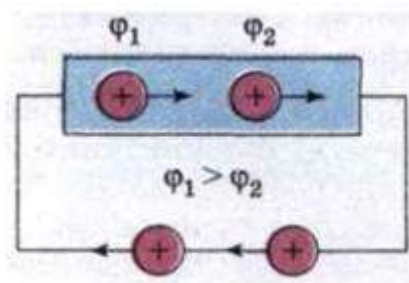
Якщо у провіднику існує електричне поле, але не створені умови для його підтримки, то переміщення носіїв струму (електронів, йонів) за короткий час призведе до того, що поле всередині провідника зникне і струм припиниться.

Як вам уже відомо, за напрям струму взято напрям руху позитивно заряджених носіїв. Вони рухаються в напрямі напруженості поля в провіднику, тобто в бік зменшення потенціалу.

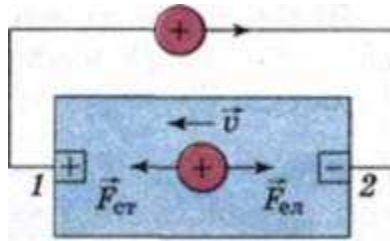
Переміщення носіїв струму в провіднику без підтримки електричного поля приводить до вирівнювання потенціалів уздовж провідників. Тому для того, щоб підтримувати струм тривалий час, треба від кінця провідника з меншим потенціалом (носії струму вважаються позитивно зарядженими) безперервно відводити заряди, які приносяться до цього кінця провідника струмом, а до кінця з більшим потенціалом безперервно їх підводити. Іншими словами, необхідно здійснити кругообіг зарядів, щоб вони рухалися замкненим контуром (мал. 17).

Здійснити такий рух носіїв струму тільки за наявності електростатичного поля не можна. Адже рух позитивно заряджених носіїв струму від кінця провідника з меншим потенціалом до кінця провідника з більшим потенціалом відбувається проти дії кулонівських сил — сил електростатичного поля. Отже, у замкненому колі повинні бути ділянки, де перенесення позитивних зарядів відбувається проти сил електростатичного поля. Переміщення носіїв заряду на цих ділянках можливе лише за допомогою сил неелектростатичного походження, які мають назву — сторонні сили.

Таким чином, для підтримки струму потрібні сторонні сили, що діють або в усьому колі, або на окремих його ділянках. Ці сили можуть бути обумовлені хімічними процесами, дифузією носіїв струму в неоднорідному середовищі або через межу між двома різнорідними речовинами, електричними



Мал. 17



Мал. 18

або неелектростатичними полями, які породжуються змінними у часі магнітними полями.

Сторонні сили можна охарактеризувати роботою, яку вони виконують над зарядами, що переміщуються по колу.

Величина, яка визначається роботою сторонніх сил над одиничним позитивним зарядом, називається електрорушійною силою (ЕРС), що діє в колі або

Позначається ЕРС літерою $\mathcal{E}$. Тоді $\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$,

Одиницею ЕРС у СІ є 1 вольт

$$(1 \text{ В}): 1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}.$$

У визначенні ЕРС можна говорити про ту ділянку кола, де діють сторонні сили, а також можна говорити про все замкнене коло. Ці визначення еквівалентні.

Дійсно, під час руху зарядів між полюсами джерела у зовнішньому колі роботу виконують тільки електростатичні сили $\vec{F}_{ел}$. У внутрішній частині кола роботу виконують як електростатичні, так і сторонні сили $\vec{F}_{ст}$ (мал. 18). При цьому робота електростатичних сил A_{12} у зовнішньому колі дорівнює роботі електростатичних сил $A_{2,1}$ між тими самими полюсами всередині джерела, взятої з протилежним знаком: $A_{1,2} = -A_{2,1}$. Повна робота у всьому колі складається із суми робіт електростатичних сил у зовнішній ділянці кола і сил у внутрішній ділянці. Остання складається з роботи електростатичних сил $A_{2,1}$ і роботи сторонніх сил $A_{ст}$: $A = A_{1,2} + A_{2,1} + A_{ст} = A_{ст}$,

Повна робота всіх сил у повному колі дорівнює роботі тільки сторонніх сил, де вони діють.

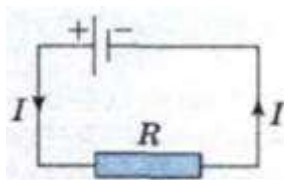
Сила струму, напруга і ЕРС — величини скалярні. Вони можуть бути як позитивними, так і негативними, залежно від вибору напрямку обходу контуру зі струмом. У випадку збігу напрямку струму з вибраним позитивним напрямком обходу кола сила струму є

позитивною (мал. 19). ЕРС джерела позитивна, якщо з вибраним напрямом обходу контуру збігається напрям сторонніх сил у джерелі.

ЕРС зосереджена тільки всередині джерела, а її значення не залежить від сили струму в колі.

Розглянемо найпростіше повне або замкнене коло, яке складається з джерела струму (гальванічного елемента або акумулятора, або генератора струму), споживача струму — резистора опором r ? (мал. 19). Будь-яке джерело струму має ЕРС $\mathcal{E}$ і опір r , який називають внутрішнім опором на відміну від зовнішнього опору R ? кола. У гальванічних елементах r — це опір розчинів електrolітів і електродів, у генераторах струму — опір обмоток.

Покажемо зв'язок сили струму в колі I , ЕРС $\mathcal{E}$ і повного опору $R + r$ кола. Для цього скористаємося законом збереження енергії і законом Джоуля — Ленца: $Q = I^2 R \Delta t$.



Нехай за час Δt через поперечний переріз провідника пройде заряд Δq . Тоді роботу сторонніх сил з переміщення заряду Δq можна визначити так:

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E} \Delta q.$$

Скориставшись визначенням сили струму $\Delta q = I \Delta t$, отримаємо

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t.$$

За рахунок цієї роботи у внутрішній і зовнішній ділянках кола, опори яких r і R , виділяється кількість теплоти, яка за законом Джоуля — Ленца дорівнює

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t.$$

Згідно із законом збереження енергії $A = Q$. Прирівнявши рівняння

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t \text{ і } Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t, \text{ отримаємо}$$

$$\mathcal{E} = IR + Ir.$$

Добуток сили струму і опору ділянки кола $\mathcal{E}$ називають спадом напруги на цій ділянці. Таким чином, ЕРС $\mathcal{E}$ дорівнює сумі спадів напруг у внутрішній і зовнішній ділянках повного кола. У замкненому колі постійного струму сума спадів напруг у зовнішній і внутрішній ділянці кола є величиною сталою і дорівнює ЕРС джерела струму.

Перепишемо вираз $\mathcal{E} = IR + Ir$ в іншому вигляді:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Сила струму в повному колі визначається відношенням ЕРС кола до його повного.

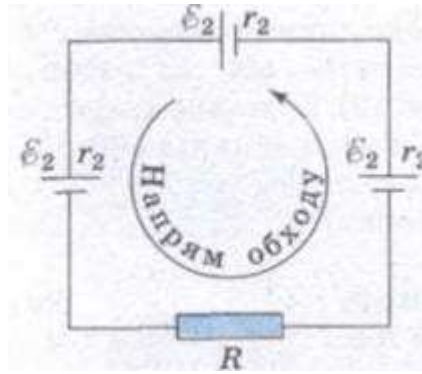
Цей закон отримав назву — закон Ома для повного кола.

Таким чином, сила струму в повному колі залежить від трьох величин: ЕРС $\mathcal{E}$, опору її зовнішньої і опору r внутрішньої ділянок кола. Внутрішній опір джерела струму не впливає помітно на силу струму, якщо він дуже малий порівняно з опором зовнішньої частини кола ($R \gg r$). При цьому напруга на затискачах джерела приблизно дорівнює ЕРС $\mathcal{E}$: $U = IR \approx \mathcal{E}$.

Проте під час короткого замикання ($R \rightarrow 0$) сила струму в колі визначається саме внутрішнім опором джерела і може досягти при ЕРС $\mathcal{E}$ у кілька вольтів великого значення, якщо опір малий (наприклад, $r = 0,1\text{—}0,001$ Ом). Провідники при цьому плавляться, а джерело виходить з ладу.

Якщо коло містить кілька послідовно з'єднаних елементів, ЕРС яких $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3, \dots, \mathcal{E}_n$, то повна ЕРС $\mathcal{E}$ кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС окремих елементів. Для визначення знака ЕРС "будь-якого джерела струму треба спочатку вибрати додатний напрям обходу контуру. На мал. 20 додатним вважається напрям обходу проти руху стрілки годинника. Якщо при обході кола переходять від негативного полюса джерела до позитивного, негативного, то ЕРС $\mathcal{E} < 0$.

Сторонні сили всередині джерела виконують при цьому додатну роботу. Якщо ж при обході кола переходять від позитивного полюса джерела до негативного, то ЕРС $\mathcal{E} < 0$. Сторонні сили всередині джерела виконують від'ємну роботу. Для кола, зображеного на мал. 20, при обході контуру проти



Мал. 20

руху стрілки годинника:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| + |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

Якщо $\mathcal{E} > 0$, то згідно з $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ сила струму $I > 0$, тобто напрям струму

збігається з напрямом обходу контура. При $\mathcal{E} < 0$, навпаки, напрям струму протилежний напрямку обходу контура. Повний опір кола R_n дорівнює сумі всіх опорів:

$$R_n = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

Це цікаво знати

До сорока років свого життя Георг Ом (він народився 16 березня 1789 року) встиг об'їхати багато міст Німеччини. Весь південний захід — від Мюнхена до Кельна — йому був уже добре відомий.

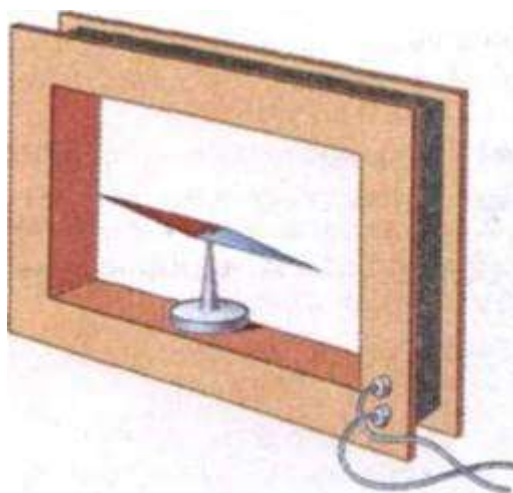
Але Георг Ом не був багатим туристом. Він подорожував з нужди, шукаючи роботу. Будучи сином слюсаря, через нестатки він залишив навчання у вищій школі і взявся за викладацьку роботу. Георг Ом любив фізику і математику, а повинен був викладати в гімназіях грецьку і латинську мови. Лише на дозвіллі він міг цілком віддати себе улюбленим заняттям з фізики.

Ом знав про найновіші відкриття Ерстеда і Ампера. «Як уявити собі електричний струм?» — це було перше питання, на яке протягом кількох років намагався дати ясну відповідь уже немолодий фізик-аматор.

Учителюючи в Кельні, він любив відігнати втому прогулянкою вздовж Рейна. І, хто знає, може, тут, на берегах цієї ріки, Георг Ом знайшов те, що допомогло йому відкрити великий закон.

«Що рухає води Рейна вперед, на північ — в Ессен, Голландію і Північне море? Очевидно, різниця у висоті положення початку і кінця ріки. Що ж примушує проходити по колу електричний струм? Як собі це уявити? Очевидно, один з полюсів гальванічної батареї являє собою ніби вищий рівень електричних зарядів, ніж їх рівень біля другого полюса. І тому електричний струм тече по колу, як вода в річці, від вищих місць до нижчих», — так, мабуть, міркував Ом.

Він знав, що силу водяного потоку легко виміряти. Для цього треба знати кількість води, яка протікає за секунду через поперечний переріз потоку. «А як визначити потік електрики?» — думав Ом. І він знову порівнював електричний струм із водяним потоком, користуючись законами стародавньої науки гідравліки, науки про закони руху рідин. Очевидно, виміряти кількість електрики, яка проходить за одиницю часу, тобто



Мал 21

за одну секунду, через переріз провідника, це і є визначення сили електричного струму.

Як збільшити силу електричного струму? Для цього, мабуть, треба пропустити через той самий переріз за той самий час — за секунду — більшу кількість електрики. Якби русло Рейна було крутіше, то його води неслися б значно швидше. Те саме, мабуть, відбувається і в гальванічному полі. Різниця електричних рівнів на полюсах батареї — це той напір, який є причиною руху електричного струму, і від величини цього напору залежить сила електричного струму. Назвемо цю різницю висот електричних рівнів, або цей напір, електрорушійною силою батареї. Завдяки низці міркувань Ом установив три поняття: 1) силу струму — кількість електрики, що проходить через переріз провідника за одну секунду, 2) електрорушійну силу — напір, під яким тече електрика, 3) опір — протидію проходженню струму, що залежить від речовини, довжини, площі поперечного перерізу і фізичного стану речовини провідника.

У той час Ом жив у Берліні, обіймаючи посаду викладача математики Берлінського політехнічного інституту. Він встиг ґрунтовно ознайомитися з працями видатного фізика Фур'є, який встановив закони теплопровідності і помітив значну подібність явищ

теплопровідності та електропровідності. Це прискорило відкриття Омом основного закону, названого його ім'ям.

Свої досліді Ом проводив у лабораторії інституту, вони давалися нелегко. Справа в тому, що сила струму гальванічної батареї із незрозумілих Ому причинне лишалась постійною. Тому він з радістю прийняв пропозицію фізика Поггендорфа використати для дослідів нове джерело електрики — термоелемент, який був відкритий незадовго до того. Це джерело давало струм постійної сили. Термоелемент мав досить просту будову, яка базувалася на відкритті Зеебека. Між двома мідними дротинами був припаяний стержень із вісмуту. Щоб одержати найбільшу електрозбуджувальну силу термоелемента, Ом опускав один із спаїв у лід, а другий тримав у киплячій воді.

Щоб виміряти силу струму, Ом користувався мультиплікатором — це простий і важливий прилад, який винайшов фізики. Швейгер (мал. 21), земляк і друг Ома. Мультиплікатор являв собою магнітну стрілку, розміщену всередині кількох витків дроту. Ом спостерігав величину відхилення стрілки мультиплікатора, ввімкненого у гальванічне коло.

Спроби наочно показали, що стрілка мультиплікатора завжди відхиляється тим більше, чим коротший і товщий провідник, що замикає коло.

Стрілка мультиплікатора відхиляється менше, коли цей провідник довший і тонший. Мідний дріт у п'ять разів більшої довжини при одному і тому самому перерізі дає у п'ять разів менше відхилення стрілки мультиплікатора. Якщо ж, наприклад, вставити мідну дrottину площею перерізу в десять разів більшою, але тієї самої довжини, тоді сила струму зростає в десять раз. Однакові розміром дrottини з різних речовин (міді, заліза і ін.) дали різне відхилення стрілки мультиплікатора.

У 1827 р. було надруковано дослідження під назвою: «Гальванічне коло, математично опрацьоване Г.-С. Омом». У ньому було викладено винайдений Омом закон: «У всякому нерозгалуженому замкненому електричному колі сила струму пропорційна електрорушійній силі і обернено пропорційна до опору всього кола».