§ 5. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ



Вольфрамова нитка лампи розжарювання поступово тоншає через випаровування металу; врешті-решт у найтоншому місці нитка перегоряє. А чому лампа найчастіше перегоряє в той момент, коли її вмикають? Якщо ви не можете зараз відповісти на це запитання, поверніться до нього після опрацювання матеріалу параграфа.

1 Як рухаються електрони в металевому провіднику

У 1900 р., через три роки після відкриття електрона, німецький фізик *Пауль Друде* (1863–1906) запропонував *електронну теорію провідності металів*, відповідно до якої електрони в металах поводяться подібно до молекул ідеального газу. Зараз ця теорія має назву **класична електронна теорія.**

Згідно із класичною електронною теорією внутрішня будова металу являє собою утворену позитивно зарядженими йонами кристалічну ґратку, яка перебуває в «газі» вільних електронів. Якщо в металевому провіднику створити електричне поле, то на хаотичний рух електронів накладатиметься дрейф електронів у напрямку сили, що діє на електрони з боку електричного поля. Цей дрейф електронів і є *електричним струмом*.

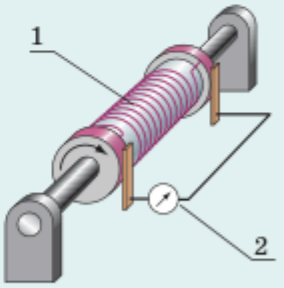
Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

Уявімо модель руху електрона в металі, в якому створено електричне поле. Відповідно до класичної теорії електрон досить короткий час розганяється електричним полем, потім, зіткнувшись із позитивним йоном, змінює напрямок свого руху, потім знову набирає швидкості в напрямку дії поля, знову зіштовхується з йоном і т. д. Під час зіткнень електрон передає йону частину кінетичної енергії, здобутої внаслідок дії поля. Саме ці зіткнення «відповідальні» за опір металу.

Визначимо *середню швидкість* $\bar{v}$ *напрямленого руху електронів*. За інтервал часу t через переріз площею S провідника проходить N електронів: $N = nS\bar{v}t$, де n — концентрація

Дослід Стюарта — Толмена

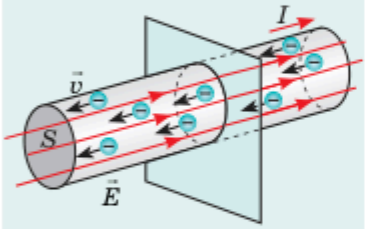
Якщо металевому провіднику (1) надати швидкого обертання, а потім різко зупинити, то вільні заряджені частинки рухатимуться за інерцією — в провіднику виникне короткочасний електричний струм. За відхиленням стрілки гальванометра (2) можна виявити, заряди якого знаку створюють цей струм, а знаючи опір провідника, силу струму та лінійну швидкість обертання, дізнатися, які саме частинки створюють струм.



Такий дослід у 1916 р. здійснили американські вчені *Річард Толмен* (1881–1948) і *Томас Стюарт* (1890–1958). Вони експериментально довели, що електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

Як швидко рухаються електрони

Середня швидкість хаотичного руху вільних електронів величезна — близько 300 км/с. Разом із тим середня швидкість їхнього напрямленого руху надзвичайно мала — кілька десятих міліметра за секунду. Чому ж, щойно ми натискаємо вмикач лампи, вона відразу спалахує? Річ у тім, що електричне поле поширюється в провіднику зі швидкістю 300 000 км/с. Завдяки дії поля вільні електрони, розташовані в будь-якій точці провідника, майже миттєво втягуються в напрямлений рух.



Оцініть, через який інтервал часу після ввімкнення плеєра ви почули б музику в навушниках, якби електричне поле поширювалось зі швидкістю напрямленого руху електронів.

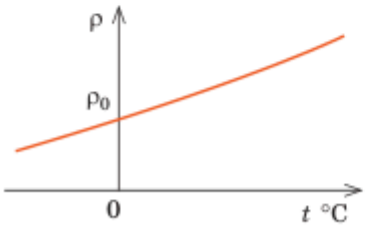


Рис. 5.1. Графік залежності питомого опору металу від температури (лінійна ділянка). Зі збільшенням температури питомий опір металу збільшується

вільних електронів у провіднику. При цьому переноситься заряд $q = N|e|$. За означенням: $I = \frac{q}{t}$. Отже, маємо:

$$I = n|e|\bar{v}S \Rightarrow \bar{v} = \frac{I}{n|e|S}$$

Визначте середню швидкість напрямленого руху електронів у мідному проводі з перерізом 1 мм^2 за сили струму 1 А, якщо концентрація вільних електронів у міді $n = 8{,}4 \cdot 10^{28}$ м$^{-3}$.

2 Як опір металів залежить від температури

Опір металевого провідника залежить не тільки від його геометричних розмірів і речовини, з якої він виготовлений, а й від температури (останнє обґрунтовано в квантовій теорії електропровідності металів). Досліди свідчать: якщо температура t металу є не надто низькою і не надто високою $(t < t_{\text{плавл}})$, питомий опір металу та опір металевого провідника залежать від температури майже лінійно (рис. 5.1):

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad R = R_0(1 + \alpha t),$$

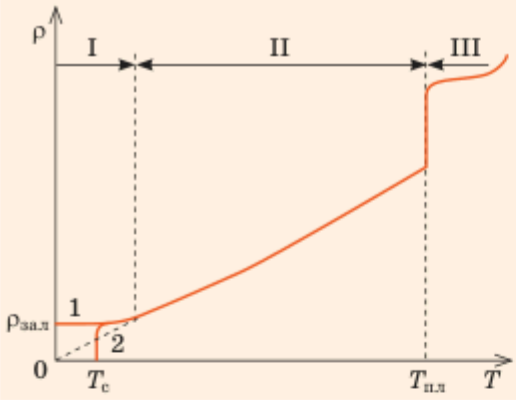
де ρ_0, R_0 — відповідно питомий опір і опір провідника за температури 0 °С; ρ, R — відповідно питомий опір і опір провідника за температури t; α — *температурний коефіцієнт електричного опору*.

Температурний коефіцієнт електричного опору — це фізична величина, яка характеризує залежність питомого опору речовини від температури.

Одиниця температурного коефіцієнта в СІ — **обернений кельвін** (кельвін у мінус першому степені): $[\alpha] = \text{К}^{-1}$ (К^{-1}).

Для всіх металів $\alpha > 0$. Наприклад, температурний коефіцієнт електричного опору алюмінію становить 0,0038 К^{-1} (див. Додаток 1).

Якщо температура металу зменшується, наближаючись до абсолютного нуля (0 К, −273 °С), або збільшується, наближаючись до температури плавлення, то залежність $\rho(t)$ вже не буде лінійною (рис. 5.2).



Ділянка I. Температура наближається до 0 К:
- у деяких металів питомий опір перестає залежати від температури і стає незмінним (вітка 1); $\rho_{зал}$ — *залишковий питомий опір*;
- питомий опір деяких металів стрибком падає до нуля (вітка 2) — *стан надпровідності*; T_c — *критична температура* (температура переходу в надпровідний стан).

Ділянка II. Лінійна ділянка: *питомий опір майже лінійно залежить від температури.*

Ділянка III. При досягненні температури плавлення питомий опір збільшується стрибком.

Рис. 5.2. Приблизний графік зміни питомого опору металу в широкому діапазоні температур

3 Знайомимося з явищем надпровідності

У 1911 р. нідерландський учений *Гейке Камерлінг-Оннес* (1853–1926), досліджуючи, як поводиться ртуть за температур, близьких до абсолютного нуля, помітив дивне явище: в разі зниження температури ртуті до 4,1 К її питомий опір стрибком падав до нуля.

Аналогічне явище спостерігалося з оловом, свинцем і низкою інших металів (рис. 5.3). Це явище назвали **надпровідністю**. Зараз відомо багато речовин і матеріалів, які за відповідної температури переходять у надпровідний стан.

Якщо в замкненому провіднику, який перебуває в надпровідному стані, створити електричний струм, то струм існуватиме в провіднику без підтримки джерела необмежений час. Ця та інші властивості надпровідників відкривають широкі можливості для їх застосування в техніці й промисловості. Тільки створення надпровідних ліній електропередачі дозволяє зекономити 10–15 % електроенергії.

Труднощі широкого застосування надпровідників пов'язані з необхідністю охолодження матеріалів

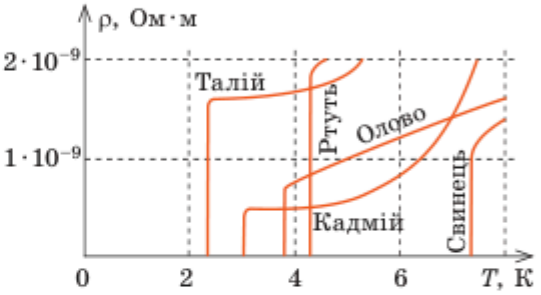


Рис. 5.3. Графіки зміни питомого опору деяких металів за температур, близьких до абсолютного нуля

«Труна Магомета»

Нульовий опір — це не єдина унікальна властивість матеріалів у надпровідному стані. У 1933 р. німецькі вчені *Вальтер Мейснер* (1882–1974) і *Роберт Оксенфельд* (1901–1993) виявили, що під час переходу в надпровідний стан магнітне поле повністю витісняється з провідника (*ефект Мейснера*).

Якщо над провідником помістити магніт і, охолоджуючи, перевести провідник у надпровідний стан, магніт буде левітувати над надпровідником. Дослід, який демонструє ефект Мейснера, назвали «труна Магомета» — вважається, що труна з тілом пророка Магомета левітувала в повітрі без жодної підтримки.

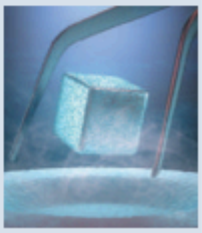




Рис. 5.4. Микола Миколайович Боголюбов (1909–1992) — видатний радянський фізик-теоретик і математик, засновник наукових шкіл у галузях нелінійної механіки, статистичної фізики і квантової теорії поля. У 1934–1959 рр. працював у Київському університеті, у 1965–1973 рр. — директор Інституту теоретичної фізики АН України (зараз цей інститут носить ім'я вченого)

до низьких температур — це досить дорого коштує. Зараз знайдено матеріали, які переходять у надпровідний стан за температури близько 100 К (–173 °С) і нижче. Останній «рекорд» високотемпературної надпровідності був поставлений у 2015 р.: за величезного тиску (1 млн атм.) сірководень (H_2S) був переведений у надпровідний стан за температури –70 °С.

Надпровідність неможливо пояснити з точки зору класичної теорії електропровідності металів. У 1957 р. група американських учених: *Джон Бардін* (1908–1991), *Леон Купер* (народ. 1930), *Джон Шріффер* (народ. 1931) — і незалежно від них радянський вчений *Микола Миколайович Боголюбов* (рис. 5.4) розробили *квантову теорію надпровідності*.

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Електричне коло складається із джерела струму, міліамперметра опором 20 Ом і реостата, обмотка якого виготовлена зі сталі. За температури 0 °С показ міліамперметра 30 мА, а опір реостата — 200 Ом. Яким буде показ міліамперметра, якщо обмотка реостата нагріється до 50 °С? Внутрішнім опором джерела та опором з'єднувальних проводів знехтувати.

Аналіз фізичної проблеми. Обмотка реостата нагрівається, і її опір збільшується, що спричиняє збільшення повного опору кола. Відповідно до закону Ома сила струму в колі зменшується. Реостат і міліамперметр з'єднані послідовно, внутрішній опір джерела дорівнює нулю, тому загальний опір кола становить $R+R_A$, де R — опір обмотки реостата за $t=50$ °С. Температурний коефіцієнт опору сталі знайдемо в таблиці (див. Додаток 1).

Дано:
$R_A = 20$ Ом
$t_0 = 0$ °С
$I_0 = 30$ мА = $= 0{,}03$ А
$R_0 = 200$ Ом
$t = 50$ °С
$\alpha = 0{,}006$ К$^{-1}$

I — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання. Запишемо закон Ома для повного кола для двох теплових станів обмотки реостата.

До нагрівання: $I_0 = \dfrac{\mathscr{E}}{R_0 + R_A} \Rightarrow \mathscr{E} = I_0(R_0 + R_A)$.

Після нагрівання: $I = \dfrac{\mathscr{E}}{R + R_A}$, де $R = R_0(1+\alpha t)$.

Після підстановки $\mathscr{E}$ і R одержуємо: $I = \dfrac{I_0(R_0 + R_A)}{R_0(1+\alpha t) + R_A}$.

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$[I] = \dfrac{\text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{Ом}} = \text{А}$; $I = \dfrac{0{,}03 \cdot (200+20)}{200 \cdot (1 + 0{,}006 \cdot 50) + 20} = 24 \cdot 10^{-3}$ (А).

Аналіз результату. Сила струму зменшилась — це реальний результат.

Відповідь: $I = 24$ мА.

Підбиваємо підсумки

• Електричний струм у металах являє собою напрямлений рух вільних електронів.

• За відсутності електричного поля вільні електрони в металах рухаються хаотично. Якщо в металевому провіднику існує електричне поле, то вільні електрони, не припиняючи свого хаотичного руху, рухаються напрямлено.

• Опір металевого провідника майже лінійно залежить від температури: $R = R_0(1 + \alpha t)$, де R_0, R — опори провідника відповідно за температури 0 °С і за даної температури t; α — температурний коефіцієнт опору.

• У разі зниження температури деяких металів до температур, близьких до абсолютного нуля, їхній опір стрибком падає до нуля. Це явище називають надпровідністю.

Контрольні запитання

1. Що являє собою електричний струм у металах? **2.** Опишіть суть досліду Стюарта — Толмена щодо виявлення природи електричного струму в металах. **3.** Як рухаються електрони в металевому провіднику з точки зору класичної фізики, якщо в провіднику створено електричне поле? **4.** У чому причина опору металів? **5.** Чи залежить опір металів від температури? Якщо залежить, то як? **6.** У чому полягає явище надпровідності?

Вправа № 5

1. На рис. 1 подано дослід. З якою метою здійснюється цей дослід? Назвіть використане обладнання. Як ви вважаєте, як і чому буде змінюватися показ вимірювального приладу під час нагрівання?
2. Чи виділяється теплота під час проходження струму в провіднику, який перебуває в надпровідному стані?
3. На рис. 2 подано графік залежності опору металевого провідника від температури. Яким є температурний коефіцієнт опору цього металу? Яка сила струму в провіднику за температури 150 °С, якщо напруга на кінцях провідника 5 В?
4. Опір нікелінової обмотки електричної печі за температури 20 °С дорівнює 60 Ом. Яким буде опір обмотки, якщо температура сягне 700 °С?
5. Яку довжину має вольфрамова нитка лампи розжарювання, розрахованої на напругу 220 В і потужність 220 Вт? Температура розжареної нитки становить 2700 К, її діаметр — 0,03 мм.
6. На залежності опору металів від температури ґрунтується дія *термометрів опору — термоперетворювачів* (рис. 3). Дізнайтесь, як побудовані такі термометри, де їх застосовують, які метали використовують для виготовлення їхнього термометричного тіла.

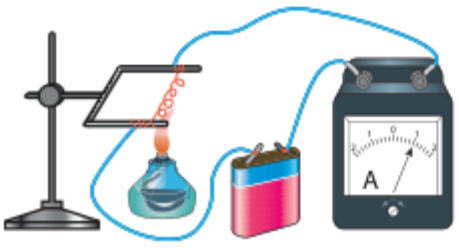


Рис. 1

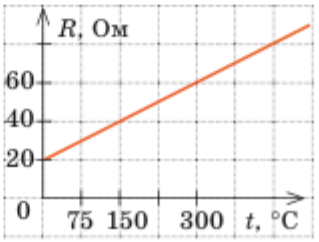


Рис. 2

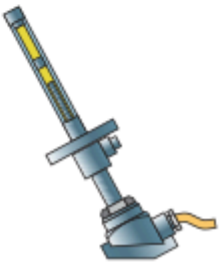


Рис. 3