

§ 5. ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ



Проводячи аналогії між гравітаційною та електростатичною взаємодіями, ми знаходили якісь спільні для них властивості. Однак між ними існують і суттєві відмінності. Одна з них (решту, сподіваємося, ви без труднощів назвете самі) — всепроникність гравітаційного поля. Справді, прихисток від сили тяжіння побудувати неможливо. А от від дії сил електростатичного поля можна досить надійно сховатися, побудувавши захист із провідника. З'ясуємо, чому це є можливим.



У чому полягають особливості внутрішньої будови провідників

Будь-яка речовина складається з молекул, атомів або йонів, які, у свою чергу, містять заряджені частинки. Тому, якщо тіло помістити в електричне поле, це спричинить певні зміни в речовині, з якої тіло виготовлене. Зрозуміло, що ці зміни залежать від властивостей самої речовини. За електричними властивостями речовини розділяють на *провідники, діелектрики та напівпровідники*.

Провідниками називають речовини, здатні проводити електричний струм. Щоб речовина була провідником, вона має містити заряджені частинки, здатні вільно пересуватися. Типові представники провідників — метали. Нагадаємо: внутрішня структура металів являє собою утворену позитивно зарядженими йонами кристалічну ґратку, яка перебуває в «газі» вільних електронів. Саме наявність вільних електронів зумовлює провідні властивості металів.

Провідниками також є електроліти (наприклад, водні розчини солей, кислот, лугів), а за деяких умов — і гази. В електролітах вільними зарядженими частинками є позитивні та негативні йони, а в газах ще й електрони.



Якими є електростатичні властивості провідників*

Провідники, поміщені в електростатичне поле, виявляють такі властивості.

Властивість 1. *Напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю.*

Розглянемо процеси, що відбуваються в провіднику і приводять до знищення електростатичного поля всередині нього. Для цього помістимо провідник в електростатичне поле (рис. 5.1). Під дією електричних сил рух вільних електронів стане напрямленим. Якщо електричне поле не надто велике,

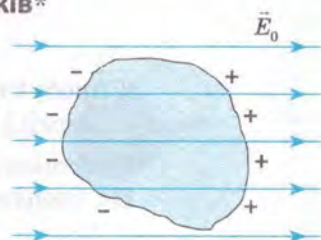


Рис. 5.1. Зовнішнє електростатичне поле індукує на поверхні провідника заряди протилежних знаків

* У даному та подібних випадках під провідником будемо розуміти провідне тіло, виготовлене з металу.

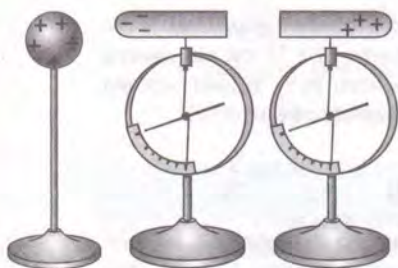


Рис. 5.2. Дослід, що демонструє явище електростатичної індукції. Якщо два металеві циліндри, які перебувають у тісному контакті один з одним, роз'єднати за присутності поряд з ними зарядженої кулі, то кожен циліндр виявиться зарядженим

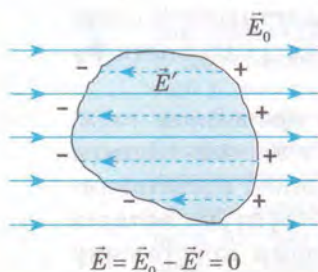


Рис. 5.3. Перерозподіл зарядів у провіднику відбувається доти, доки напруженість \vec{E}' поля індуктованих зарядів не стане дорівнювати напруженості \vec{E}_0 індуктованого поля

то електрони не можуть залишити провідник і накопичуються в певній області його поверхні, — ця область поверхні провідника набуває негативного заряду; протилежна — позитивного (його створюють позитивні йони, що там залишилися). Таким чином, на поверхні провідника з'являються *наведені (індуковані) електричні заряди*, при цьому сумарний заряд провідника, звичайно, залишається незмінним (рис. 5.2). Описане явище називають *електростатичною індукцією*.

Електростатична індукція — це явище перерозподілу електричних зарядів у провіднику, поміщеному в електростатичне поле, у результаті чого на поверхні провідника виникають електричні заряди.

Індуковані заряди, що виникли, створюють власне електричне поле напруженості \vec{E}' , яка напрямлена в бік, протилежний напруженості \vec{E}_0 зовнішнього поля (рис. 5.3). Процес перерозподілу зарядів у провіднику триватиме до того моменту, коли створюване індуктованими зарядами поле всередині провідника повністю компенсує зовнішнє поле. За дуже малий інтервал часу *напруженість $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ результуючого поля всередині провідника дорівнюватиме нулю*. Справді, якби це було не так, то під дією поля електрони весь час напрямлено рухалися б, тобто в провіднику існував би електричний струм. Але це суперечить умові електростатичності.

(Спробуйте довести *властивість 1* виходячи із закону збереження енергії.)

Властивість 2. Поверхня провідника є екіпотенціальною.

Це твердження є прямим наслідком співвідношення, що існує

між напруженістю поля та різницею потенціалів: $E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d}$. Якщо напруженість поля всередині провідника дорівнює нулю, то різниця потенціалів також дорівнює нулю, тому потенціали у всіх точках провідника однакові. Очевидно, що *точки поверхні провідника також мають однакові потенціали, тобто поверхня провідника є екіпотенціальною*.

Властивість 3. Увесь статичний заряд провідника зосереджений на його поверхні.

Дана властивість є наслідком закону Кулона та властивості одноподібних зарядів відштовхуватися. (Цікаво, що першим, хто експериментально довів цю властивість, був не Шарль Кулон, а англієць Генрі Кавендіш (1731–1810), причому за 14 років до відкриття Кулона.)

★ Доведемо властивість 3 методом від протилежного. Припустимо, що в деякій частині провідника існує заряджена ділянка. Оточимо цю ділянку замкненою поверхнею S . Згідно з теоремою Остроградського — Гаусса потік вектора напруженості електричного поля через цю поверхню відмінний від нуля і прямо пропорційний заряду, що міститься всередині поверхні. Отже, в точках цієї поверхні напруженість електростатичного поля теж має бути відмінною від нуля, але це суперечить властивості 1. Отже, всередині провідника електричний заряд дорівнює нулю.★

Властивість 4. Вектор напруженості електростатичного поля провідника напрямлений перпендикулярно до його поверхні.

Доведемо властивість 4 методом від протилежного.

Припустимо, що в певній точці поверхні провідника вектор \vec{E} напруженості електростатичного поля напрямлений під деяким кутом до поверхні провідника. Розкладемо цей вектор на два складники: нормальний \vec{E}_n , перпендикулярний до поверхні, і тангенціальний \vec{E}_τ , напрямлений по дотичній до поверхні (рис. 5.4).

Зрозуміло, що під дією \vec{E}_τ електрони напрямлено рухатимуться по поверхні, але це означає, що по поверхні провідника тече електричний струм, а це, у свою чергу, суперечить електростатичності. Отже, у випадку рівноваги зарядів: $\vec{E}_\tau = 0$, а $\vec{E} = \vec{E}_n$.

Властивість 5. Електричні заряди розподіляються по поверхні провідника так, що напруженість електростатичного поля провідника виявляється більшою на виступах провідника і меншою на його западинах.

Якісно цю властивість можна пояснити так. Нехай існує заряджений провідник неправильної форми (рис. 5.5). Нагадаємо, що будь-яке заряджене тіло на дуже великих відстанях від нього можна вважати точковим зарядом, еквіпотенціальні поверхні поля якого мають вигляд концентричних сфер. Таким чином, у міру віддалення

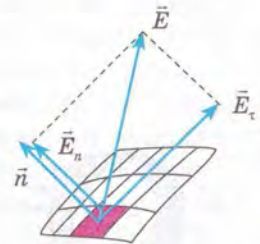
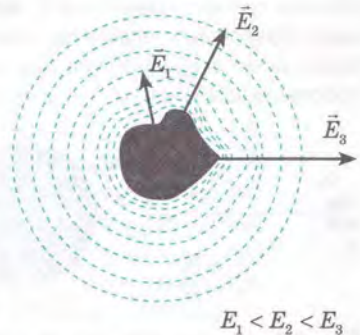


Рис. 5.4. Доведення від протилежного перпендикулярності вектора \vec{E} напруженості електростатичного поля до поверхні провідника. Насправді $\vec{E}_\tau = 0$, $\vec{E} = \vec{E}_n$, тобто напруженість \vec{E} напрямлена перпендикулярно до поверхні провідника



$$E_1 < E_2 < E_3$$

Рис. 5.5. Напруженість електростатичного поля провідника більша на виступах провідника і менша на його западинах

від провідника еквіпотенціальні поверхні, що поблизу провідника повторюють форму його поверхні, мають поступово й плавно набувати обрисів сфери. Але це можливе тільки в тому випадку, якщо еквіпотенціальні поверхні будуть згущені біля виступів провідника й розріджені біля западин (див. рис. 5.5). Там, де еквіпотенціальні поверхні розташовані густіше, напруженість електростатичного поля, яка перпендикулярна до поверхні провідника, більша, а де розташовані рідше, там напруженість поля менша.

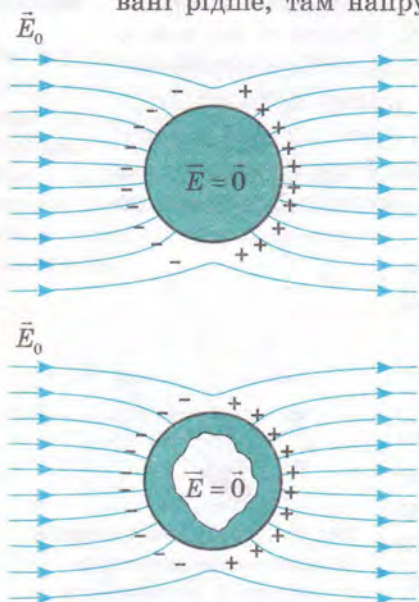


Рис. 5.6. Електростатичний захист. Під дією зовнішнього поля на поверхні кулі виникають індуковані заряди, поле яких екранує зовнішнє електричне поле: напруженість поля всередині кулі стає рівною нулю (а). Картина силових ліній поля та розподіл індукованих зарядів не змінюється, якщо всередині кулі вирізати порожнину (б)

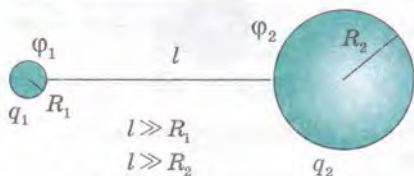


Рис. 5.7. Заряд Q , переданий системі з двох куль, з'єднаних провідником, розподілиться між кулями таким чином, що їхні потенціали ϕ_1 і ϕ_2 будуть рівними

3 Як застосовують електростатичні властивості провідників

Наведемо деякі приклади використання розглянутих електростатичних властивостей провідників.

Електростатичний захист. Іноді виникає необхідність ізолювати від впливу зовнішніх електричних полів деякі тіла, прилади. Очевидно, що для цього їх необхідно помістити всередину металевого корпусу, оскільки зовнішнє електричне поле викликає появу індукованих зарядів тільки на поверхні провідника, а поле всередині провідника дорівнює нулю (рис. 5.6). Кажуть, що провідна оболонка *екранує* зовнішнє електричне поле. Аналогічний ефект досягається навіть у тому випадку, якщо суцільну провідну оболонку замінити на металеву сітку з дрібними гніздами: електричне поле проникає за сітку на глибину порядку розмірів гнізда сітки.

Заземлення. Щоб розрядити невелике заряджене тіло, його необхідно з'єднати провідником із тілом більших розмірів, адже на тілі більших розмірів накопичується більший електричний заряд. Щоб обґрунтувати це твердження, розглянемо дві з'єднані провідником провідні кулі з радіусами R_1 і R_2 . Кулі перебувають на великій відстані l одна від одної ($l \gg R_1$, $l \gg R_2$) (рис. 5.7). Очевидно, що електричний заряд Q , переданий системі, розподілиться між кулями таким чином, що їхні потенціали будуть рівними ($\phi_1 = \phi_2$), а сумарний заряд системи не зміниться ($Q = q_1 + q_2$, де q_1 і q_2 — заряд першої та другої кулі відповідно). Відстань між кулями значно більша за їхні радіуси, тому, розраховуючи потенціал кожної кулі,

взаємним впливом їхніх полів можна знехтувати і скористатися формулою для потенціалу φ окремої кулі:

$$\varphi_1 = k \frac{q_1}{R_1}; \quad \varphi_2 = k \frac{q_2}{R_2}.$$

Оскільки $\varphi_1 = \varphi_2$, одержимо, що заряди куль прямо пропорційні їхнім радіусам: $\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_1}{R_2}$, або:

$$q_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} Q; \quad q_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} Q. \quad (1)$$

Таким чином, якщо $R_2 \gg R_1$, то з формул (1) випливає:

$$q_1 \approx 0; \quad q_2 \approx Q. \quad (2)$$

Отже, якщо одна із заряджених куль значно більша за другу, то після їх з'єднання практично весь заряд виявиться на більшій кулі. Цей висновок справджується і для провідних тіл довільної форми. Так, якщо до зарядженого електроскопа торкнутися рукою, заряд перерозподілиться між електроскопом і тілом людини, але оскільки людина значно більша за розмір пристрою, то можна вважати, що весь заряд перейде на людину. Часто як тіло великих розмірів використовують усю земну кулю: прилади, на яких не повинен збиратись електричний заряд, «заземлюють» — приєднують до масивного провідника, закопаного в землю. Вважають, що потенціал заземленого тіла дорівнює нулю і рівності (2) виконуються точно.

Підбиваємо підсумки

Провідниками називають речовини, здатні проводити електричний струм. Провідник, поміщений в електростатичне поле, має такі властивості: напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю; поверхня провідника є еквіпотенціальною; увесь статичний заряд провідника зосереджений тільки на його поверхні; вектор напруженості електростатичного поля провідника направлений перпендикулярно до його поверхні; електричні заряди розподіляються по поверхні провідника так, що напруженість електростатичного поля провідника виявляється більшою на виступах провідника і меншою на його западинах.

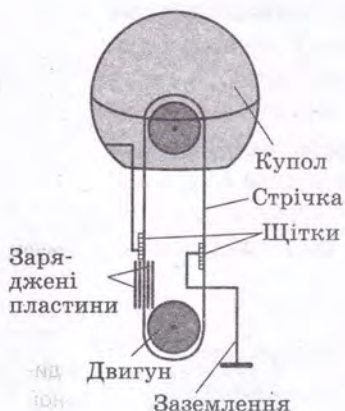
На електростатичних властивостях провідників ґрунтуються електростатичний захист і заземлення.

Контрольні запитання

1. Які речовини називають провідниками? 2. Що таке електростатична індукція? 3. Назвіть основні електростатичні властивості провідників. 4. Чому напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю? 5. Доведіть, що всередині провідника всі точки мають однаковий потенціал. 6. Як захищають обладнання та прилади від впливу електричного поля? 7. Навіщо застосовують заземлення?

Вправа № 5

1. До кондуктора зарядженого електрометра підносять (не торкаючись до нього) незаряджене провідне тіло. Як і чому зміниться відхилення стрілки електрометра? Відповідь перевірте експериментально.



2. Незаряджена гільза з фольги висить на шовковій нитці. До неї наближають заряджену паличку. Опишіть і поясніть подальшу поведінку гільзи.
3. Як за допомогою негативно зарядженої металевої кульки, не зменшуючи її заряду, негативно зарядити іншу таку саму кульку?
4. Яку електростатичну властивість провідника використовував Б. Франклін, який винайшов ефективний засіб захисту від удару блискавки?
5. На рисунку зображено принципову схему деякого обладнання. Як ви гадаєте, яке призначення має це обладнання і в чому полягає принцип його дії?
6. Металеву кульку, яка має радіус r і заряд q , поміщено в центр незарядженої металевої сфери, внутрішній і зовнішній радіуси якої дорівнюють R_1 і R_2 відповідно. Знайдіть напруженість і потенціал електростатичного поля, створеного системою, якщо: а) сфера не заземлена; б) сфера заземлена.