

§ 43. ПРОВІДНИКИ І ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ



Проводячи аналогії між гравітаційною та електростатичною взаємодіями, ми знаходили спільні для них властивості. Однак між ними існують і суттєві відмінності. Одна з них — усепроникність гравітаційного поля. Справді, сховище від сили тяжіння побудувати неможливо. А от від дії сил електростатичного поля можна сховатися досить надійно, побудувавши захист із провідника. З'ясуємо, чому це є можливим.

1 Якими є 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 виготовлено. Зрозуміло, що ці зміни залежать від властивостей самої речовини. За електричними властивостями речовини розділяють на *провідники, діелектрики, напівпровідники*.

Провідники — це речовини, здатні проводити електричний струм. Будь-який провідник містить заряджені частинки, що можуть 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, а за деяких умов — і гази. В електролітах вільними зарядженими частинками є позитивні й негативні йони, а в газах ще й електрони.

2 Електростатичні властивості провідників

Властивість 1. Напруженість електростатичного поля всередині провідника дорівнює нулю. Помістимо металевий провідник в електростатичне поле (рис. 43.1). Під дією поля рух вільних електронів стане напрямленим. Якщо електричне поле не надто велике, 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 залишається незмінним (рис. 43.2).

Явище перерозподілу електричних зарядів у провіднику, поміщеному в електростатичне поле, у результаті чого на поверхні провідника виникають електричні заряди, називають **явищем електростатичної індукції**.

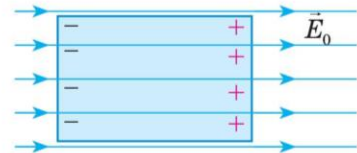


Рис. 43.1. Зовнішнє електричне поле індукує на поверхні провідника заряди протилежних знаків

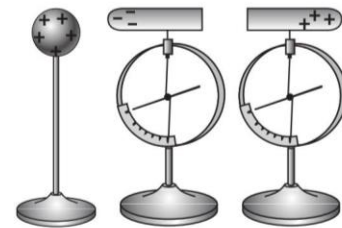


Рис. 43.2. Якщо два металеві циліндри, які контактують один з одним, роз'єднати за присутності поряд зарядженої кулі, то кожен циліндр виявиться зарядженим

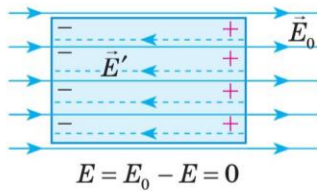


Рис. 43.3. Перерозподіл зарядів у провіднику відбувається доти, доки модуль напруженості \vec{E}' поля індукованих зарядів не дорівнюватиме модулю напруженості \vec{E}_0 індукованого поля

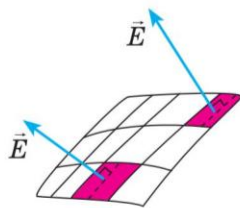


Рис. 43.4. У будь-якій точці поверхні провідника напруженість \vec{E} електричного поля напрямлена перпендикулярно до цієї поверхні

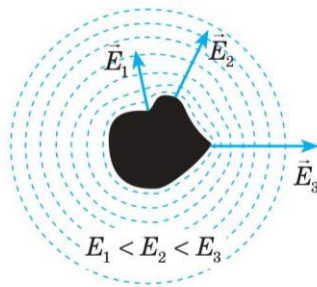


Рис. 43.5. Напруженість електростатичного поля провідника більша на виступах провідника і менша на його западинах

Індуковані заряди, що виникли, створюють власне електричне поле напруженістю \vec{E}' , яка напрямлена в бік, протилежний напруженості \vec{E}_0 зовнішнього поля (рис. 43.3). Процес перерозподілу зарядів у провіднику триватиме до моменту, коли створене індукованими 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.

? Який процес відбувався б, якби всередині провідника тривалий час існувало електричне поле?

Властивість 2. Поверхня провідника є екіпотенціальною. Це твердження є прямим наслідком зв'язку між напруженістю поля і різницею потенціалів: $E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d}$. Якщо напруженість поля всередині провідника дорівнює нулю, то різниця потенціалів також дорівнює нулю, тому потенціали в усіх точках провідника є однаковими.

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

Ця властивість є наслідком закону Кулона і властивості однойменних зарядів відштовхуватися.

Властивість 4. Вектор напруженості електростатичного поля є перпендикулярним до поверхні провідника (рис. 43.4).

Доведемо властивість 4 методом від супротивного. 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.

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 закону збереження енергії, отже: $\vec{E}_\tau = 0$, тому $\vec{E} = \vec{E}_n$.

Властивість 5. Електричні заряди розподіляються по поверхні провідника так, що напруженість електростатичного поля провідника виявляється більшою на виступах провідника і меншою на його западинах (рис. 43.5).

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 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 відсутнє (рис. 43.6). Аналогічний ефект досягається, якщо суцільну провідну оболонку замінити металевою сіткою з дрібними гніздами: електричне поле проникає за сітку лише 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 радіусами R_1 і R_2 , розташовані одна від одної на великій (порівняно з їхніми радіусами) відстані l (рис. 43.7). Електричний заряд Q , переданий системі, розподілиться між кулями таким чином, що їхні потенціали будуть рівними ($\phi_1 = \phi_2$). Відстань між кулями значно більша за їхні радіуси, тому, розраховуючи потенціали ϕ_1 і ϕ_2 куль, взаємним впливом їхніх полів можна знехтувати і скористатися формулою для визначення потенціалу кулі:

$$\phi_1 = k \frac{q_1}{R_1}; \quad \phi_2 = k \frac{q_2}{R_2}.$$

Оскільки $\phi_1 = \phi_2$, одержимо, що заряди куль прямо пропорційні їхнім радіусам: $\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_1}{R_2}$.

Зверніть увагу! Якщо одна із заряджених куль значно більша за другу, після їх з'єднання практично весь заряд виявиться на більшій кулі. Цей висновок справджується і для провідних тіл довільної форми. Так, якщо до кондуктора зарядженого електроскопа торкнутися рукою, заряд перерозподілиться між кондуктором 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.

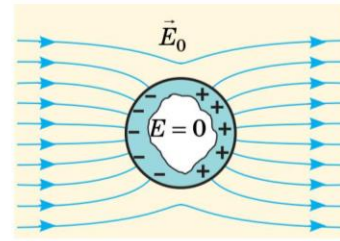


Рис. 43.6. Електростатичний захист. Під дією зовнішнього поля на поверхні металевого корпусу виникають індуковані заряди, поле яких екранує зовнішнє електричне поле: напруженість поля всередині корпусу стає рівною нулю

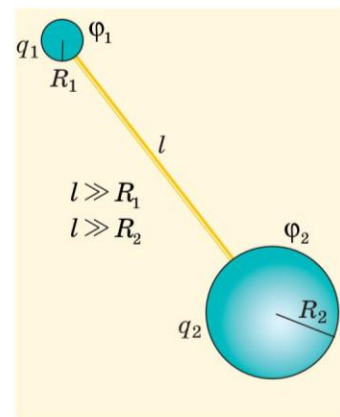

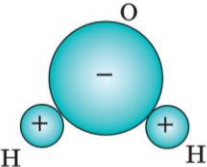
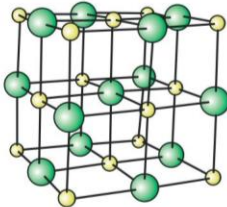


Рис. 43.7. Заряд Q , переданий системі з двох куль, з'єднаних провідником, розподілиться між кулями таким чином, що їхні потенціали ϕ_1 і ϕ_2 будуть рівними

4 Які особливості внутрішньої будови діелектриків

Діелектриками називають речовини, які погано проводять електричний струм: за звичайних умов в них практично відсутні заряди, що можуть вільно пересуватися. Залежно від хімічної будови діелектрики поділяють на три групи.

Неполярні діелектрики	Полярні діелектрики	Йонні діелектрики
<p>Речовини, молекули (атоми) яких неполярні: за відсутності зовнішнього електростатичного поля центри розподілу позитивних і негативних зарядів, з яких складається молекула (атом), збігаються.</p>  <p>Типовими прикладами таких речовин є одноатомні інертні гази; гази, що складаються із симетричних двоатомних молекул; деякі органічні рідини; пластмаси.</p>	<p>Речовини, молекули яких полярні: за відсутності зовнішнього електростатичного поля центри розподілу позитивних і негативних зарядів, з яких складається молекула, не збігаються, тобто електронні хмари в молекулах зміщені до одного з атомів.</p>  <p>Прикладом полярного діелектрика є вода (H_2O). Молекули води, як і молекули інших полярних діелектриків, являють собою мікроскопічні електричні диполі.</p>	<p>Речовини, які мають йонну структуру. Серед них солі та луги, наприклад натрій хлорид (NaCl). Кристалічні ґратки багатьох йонних діелектриків можна розглядати як такі, що складаються з двох вставлених одна в одну підґраток, кожна з яких утворена йонами одного знака. За відсутності зовнішнього поля кожна комірка кристала в цілому є електронейтральною.</p> 

5 Як електростатичне поле впливає на діелектрик

Внесення діелектрика в зовнішнє електростатичне поле спричиняє *поляризацію діелектрика*. У процесі поляризації *неполярних* діелектриків виявляється *електронний (деформаційний) механізм*. Під дією зовнішнього електростатичного поля молекули неполярних діелектриків поляризуються:

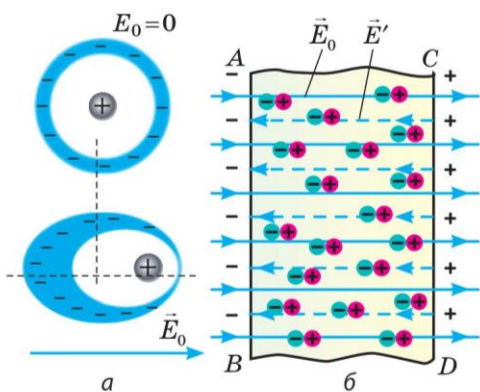


Рис. 43.8. Неполярний діелектрик в електростатичному полі напруженості \vec{E}_0

позитивні заряди зміщуються в напрямку вектора напруженості \vec{E}_0 цього поля, а негативні — у протилежному напрямку (рис. 43.8, а). Зрештою молекули перетворюються на електричні диполі, розташовані ланцюжками вздовж силових ліній зовнішнього поля. У результаті на поверхнях AB і CD з'являються некомпенсовані зв'язані заряди протилежних знаків, що утворюють своє поле, напруженість \vec{E}' якого напрямлена назустріч напруженості \vec{E}_0 зовнішнього поля (рис. 43.8, б).

У процесі поляризації *полярних діелектриків* виникає *орієнтаційна поляризація*. Під дією зовнішнього електричного поля дипольні молекули діелектрика намагаються повернутися так, щоб їхні осі були розташовані вздовж силових ліній поля. Проте тепловий рух молекул перешкоджає цьому процесу. Тому виникає лише часткове впорядкування дипольних молекул (рис. 43.9).

Наявність упорядкування в розташуванні молекул є причиною того, що на поверхнях *AB* і *CD* з'являються некомпенсовані зв'язані заряди протилежних знаків. Ці заряди утворюють своє поле напруженістю \vec{E}' , напрямом якої протилежний напрямку напруженості \vec{E}_0 зовнішнього поля. Зауважимо, що в полярних діелектриках наявний і *електронний механізм поляризації*, тобто внаслідок дії електричного поля відбувається зсув зарядів у молекулах. Однак ефект орієнтації на кілька порядків перевершує електронний ефект, тому останнім часто нехтують.

У процесі поляризації *йонних діелектриків* спостерігається *йонна поляризація*. Унаслідок дії зовнішнього поля йони різних знаків, що складають дві підґратки, зміщуються в протилежних напрямках, від чого на гранях кристала з'являються некомпенсовані зв'язані заряди, тобто кристал поляризується. Слід підкреслити, що йонна поляризація в чистому вигляді не спостерігається, — її завжди супроводжує електронна поляризація.

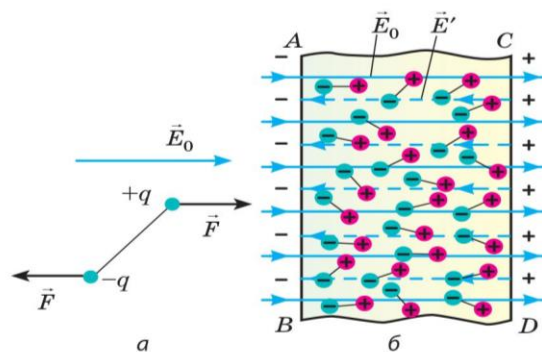


Рис. 43.9. Полярний діелектрик в електростатичному полі напруженістю \vec{E}_0

6 Як діелектрик впливає на електростатичне поле

Розглядаючи різні механізми поляризації діелектриків, ви дізналися, що внесення діелектрика в зовнішнє електростатичне поле спричиняє появу зв'язаних зарядів на його поверхні. Зв'язані заряди створюють електричне поле напруженістю \vec{E}' , яка всередині діелектрика напрямлена протилежно вектору напруженості \vec{E}_0 зовнішнього поля. Через це поле всередині діелектрика слабшає. У результаті напруженість \vec{E} результуючого поля всередині діелектрика виявляється за модулем меншою, ніж напруженість \vec{E}_0 зовнішнього поля: $E = E_0 - E'$. Зменшення модуля напруженості \vec{E} електростатичного поля в речовині порівняно з модулем напруженості \vec{E}_0 електростатичного поля у вакуумі характеризується фізичною величиною, яку називають **діелектрична проникність ϵ речовини**:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

Діелектричні проникності різних речовин можуть відрізнятися в десятки разів. Так, діелектрична проникність газів близька до одиниці,

рідких і твердих неполярних діелектриків — до кількох одиниць, полярних діелектриків — до кількох десятків одиниць (для води $\epsilon = 81$). Є речовини (їх називають *сегнетоелектриками*), діелектрична проникність яких стає значення порядку десятків і сотень тисяч.

Зменшення напруженості електричного поля в діелектрику в ϵ разів порівняно з напруженістю поля у вакуумі спричиняє те саме зменшення сили електростатичної взаємодії. Тому закон Кулона для випадку взаємодії двох електричних зарядів, які мають значення q_1 і q_2 і розташовані в діелектрику на відстані r один від одного, має вигляд: $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$.

Так само змінюються формули для визначення потенціалу ϕ і модуля напруженості E поля, створеного точковим зарядом Q , розташованим у діелектрику: $\phi = k \frac{Q}{\epsilon r}$, $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$, де r — відстань від заряду до точки, в якій визначається напруженість або потенціал поля.

? Сформулюйте підсумки § 43 самостійно. Спробуйте використати не більше 150–200 слів.