

Тема 6. Провідники в електричному полі

Питання теми

- 6.1. Розподіл надлишкових зарядів, напруженості і потенціалу в провіднику.
- 6.2. Провідник в електричному полі. Захист від електричних полів.
- 6.3. Електроємність провідників. Конденсатори.
- 6.4. Приклади розрахунку ємності конденсаторів.

6.1. Розподіл надлишкових зарядів, напруженості і потенціалу в провіднику

Провідник (метал) – складається з додатньо заряджених іонів у кристалічній ґратці і рівної їм кількості від’ємних зарядів – електронів. В цілому він електронейтральний, заряди компенсують один одного (рис. 6.1) .

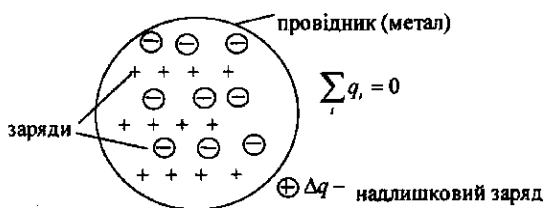


Рис. 6.1

Провідник складається з позитивно заряджених іонів та рівної їм кількості негативних електронів і в цілому є електронейтральним

Однак на провідник можна помістити **надлишковий** додатний або від'ємний заряд Δq . І оскільки заряд в провіднику може перемішуватись під дією дуже малої сили, то він легко розпливається по провіднику, доки не настане рівновага. Як же розподіляється надлишковий заряд в провіднику при рівновазі?

Якщо електричні заряди знаходяться у рівновазі, то в провіднику нема електричного струму. А це означає, що напруженість поля E в будь-якій точці всередині провідника рівна нулю: $E_i = 0$.

Дійсно, якби ця умова не виконувалась, то рухливі носії заряду – електрони, під дією сил поля прийшли б у рух і рівноваги не було б.

Знайдемо розподіл надлишкових зарядів у провіднику. Для цього застосуємо рівняння Пуассона до внутрішньої області металу:

$$\frac{dE_x}{dx} + \frac{dE_y}{dy} + \frac{dE_z}{dz} = \frac{\rho_i}{\epsilon_0}.$$

Оскільки E_x , E_y , E_z дорівнюють нулеві, то густина надлишкового заряду всередині металу $\rho_i = 0$.

Це означає, що **надлишковий заряд Δq в провіднику розподіляється по поверхні** (рис. 6.2).

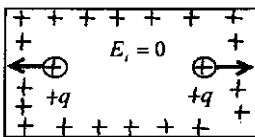


Рис. 6.2

Цей висновок випливає також з того, що однойменні заряди взаємно відштовхуються і розміщуються на найбільшій відстані один від одного – на поверхні.

Надлишковий заряд в провіднику розподіляється по поверхні

Так як в стані рівноваги всередині провідника надлишкових зарядів нема, то видалення речовини із внутрішньої частини провідника ніяк не відіб'ється на рівноважному розподілі зарядів. Рівноважний розподіл надлишкових зарядів у порожнинному провіднику буде таким же, як і в суцільному, тобто **надлишкові заряди** розподілені тільки на поверхні (рис. 6.3).

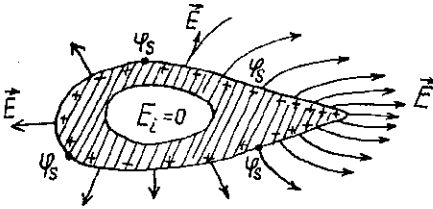


Рис. 6.3

Причому, вони повинні розподілитися так, щоб потенціали поверхні в будь-якій точці були однакові і рівні потенціалу всередині провідника. Якби цього не було, існувала б різниця потенціалів на поверхні і заряди прийшли б у рух, чого нема при рівновазі. Таким чином, в умовах рівноваги **поверхня провідника еквіпотенціальна**. З цього випливає, що **вектор напруженості поля перпендикулярний до поверхні**. Причому там, де є гострі виступи, напруженість поля більша. Це можна обґрунтувати таким чином.

Натисніть
на символ



15Pprov.flv



17Porozh.flv

Нехай ми маємо дві кулі різних радіусів. Їх потенціали

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} = \frac{\sigma_1 S}{4\pi\epsilon_0 R_1} = \frac{\sigma_1 4\pi R_1^2}{4\pi\epsilon_0 R_1} = \frac{\sigma_1 R_1}{\epsilon_0},$$

$$\varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} = \frac{\sigma_2 S}{4\pi\epsilon_0 R_2} = \frac{\sigma_2 4\pi R_2^2}{4\pi\epsilon_0 R_2} = \frac{\sigma_2 R_2}{\epsilon_0}.$$

Якщо потенціали обох куль рівні ($\varphi_1 = \varphi_2$) то $\sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2$, звідки маємо:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Тобто, куля з меншим радіусом має більшу густину заряду. А оскільки напруженість поля на поверхні кулі $E = \sigma/\epsilon_0$, то це означає, що там, де більша кривизна поверхні, більша напруженість поля і силові лінії проходять густіше. Таке справедливо також для поверхні металу з виступами, вістрями. Напруженість поля поблизу загострень може бути настільки великою, що відбувається іонізація газу. Це явище використовується в радіотехніці у високовольтних стабілітронах коронного розряду (рис. 6.4).

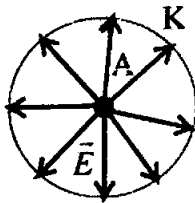


Рис. 6.4

Катод стабілітрона має форму циліндра, а анод – у вигляді тонкого стержня, тому поблизу нього напруженість поля набагато більша і силові лінії густіші, ніж біля катода.

Поверхня зарядженого провідника є еквіпотенціальною

6.2. Провідник в електричному полі. Захист від електричних полів

При внесенні незарядженого провідника в електричне поле носії заряду розділяються: додатні зміщуються в напрямку \vec{E}_0 , від'ємні – в протилежну сторону (рис. 6.5).

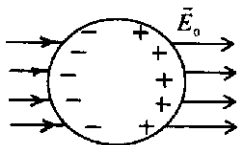


Рис. 6.5

В результаті на кінцях провідника виникають так звані **індуковані** заряди. Поле цих зарядів E' напрямлене протилежно до зовнішнього поля.

Перерозподіл носіїв заряду відбувається до тих пір, доки напруженість поля всередині провідника не стане рівною нулеві.

Натисніть
на символ



17Porozh.flv

Поле всередині провідника рівне нулю

Оскільки поле всередині провідника рівне нулю, то внутрішню частину його можна видалити і використати провідник для екранування від електростатичних полів, що широко застосовується в радіотехніці (екранування провідників, радіодеталей, тощо, рис. 6.6; 6.7).

Натисніть
на символ

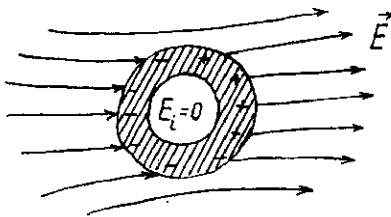


Рис. 6.6

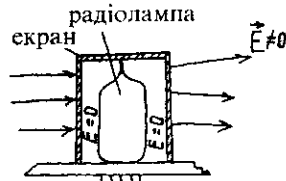


Рис. 6.7



13Ekr.flv



14Ekran.flv

Відсутність поля всередині провідника використовується для екранування від зовнішніх полів

6.3. Електроємність провідників. Конденсатори

Електроємність – це здатність провідника чи системи провідників накопичувати (нагромаджувати) заряд – мається на увазі надлишковий заряд. Така здатність "вміщувати" в собі електричний заряд – електроємність – у різних провідників неоднакова.

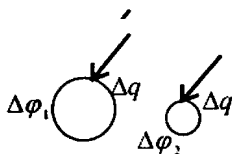


Рис. 6.8

Дослідним шляхом встановлено, що якщо надавати однаковий заряд провідникам різної форми і розмірів, то їх потенціал підвищується не на однакову величину (рис. 6.8).

Для окремого провідника (без близького оточення) зв'язок між поміщенням на нього зарядом Δq і зміною потенціалу $\Delta \phi$ – лінійний, тобто прямопропорційний: $\Delta q = C \Delta \phi$, звідки

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \phi}$$

електроємність чисельно рівна заряду, який треба надати провіднику, щоб змінити його потенціал на 1В.

В системі СІ за одиницю ємності прийнято один Фарад. Фарад – це дуже велика ємність. В техніці застосовуються менші одиниці: 1 мікрофарад = 10^{-6} Ф (мкФ); 1 пікофарад = 10^{-12} Ф (пФ).

Відсторонені (виокремлені) провідники мають малу ємність. Наприклад, провідник такого розміру як Земля мав би ємність $C \approx 4 \cdot 10^{-4}$ Ф.

Натисніть
на символ



Відсторонені (виокремлені) провідники мають малу ємність

Однак на практиці буває потреба в пристроях, які б при невеликому потенціалі нагромаджували на собі (конденсували) більший заряд. Такі пристрої називаються **конденсаторами**.

В основу конденсатора покладено той факт, що електроємність провідника зростає при наближенні до нього інших провідників (рис. 6.9).

Під дією поля, що створюється зарядженим провідником A , на піднесеному до нього тілі B виникають індуковані заряди протилежного знаку на поверхні, ближчій до провідника, і одноїменні заряди на віддаленій поверхні.

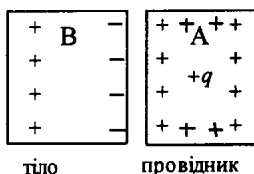


Рис. 6.9

Заряди протилежного знаку знаходяться ближче до провідника і створюють більший вплив на його потенціал. Абсолютна величина потенціалу провідника при дії цього заряду іншого знаку повинна зменшитись.

Натисніть
на символ



10P_pl_k.flv

Так як заряд на провіднику не змінюється, то його ємність зростає: $C = \frac{q}{\phi}$. Причому, заряд

q не змінюється, а потенціал ϕ – змінюється. І чим ближче тіло до провідника, тим більша ємність провідника. Ця властивість невіокремленого провідника використовується для виготовлення конденсаторів – накопичувачів заряду (рис. 6.10).



Рис. 6.10

Конденсатори виготовляють у вигляді провідників, розміщених близько один до одного так, щоб поле максимально було сконцентроване всередині конденсатора.

За конструкцією бувають плоскі і циліндричні конденсатори.

Натисніть
на символ



12Cyl_k.flv

**Електроємність провідника
значно зростає
при наближенні до нього
інших провідників**

6.4. Приклади розрахунку ємності конденсаторів

Ємність плоского конденсатора. В загальному випадку ємність конденсатора

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \varphi}.$$

Для плоского конденсатора $\Delta \varphi = Ed$. Оскільки напруженість поля двох різнойменно заряджених пластин (рис. 6.11)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} = \frac{\Delta q}{S \epsilon \epsilon_0},$$

то

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta q}{S \epsilon \epsilon_0} d.$$

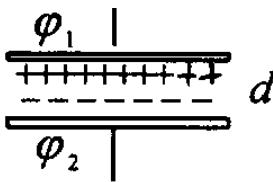


Рис. 6.11

Таким чином, ємність плоского конденсатора

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \varphi} = \frac{\Delta q}{\frac{\Delta q}{S \epsilon \epsilon_0}},$$

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}.$$

Ємність циліндричного конденсатора

Напруженість поля, що створюється циліндричною зарядженою поверхнею (2.19):

$$E_r = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r},$$

де $\tau = \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{\Delta q}{l}$ – лінійна густина заряду.

Знайдемо вираз для ємності такого конденсатора.

Нехай електроди мають потенціали Φ_1 і Φ_2 (рис. 6.12).

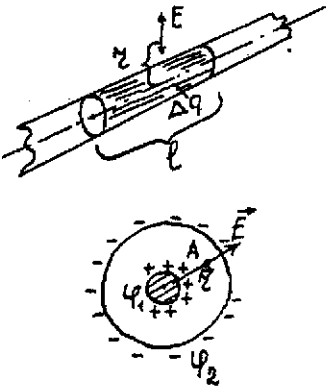


Рис. 6.12

Згідно з теоремою Остроградського-Гаусса заряд зовнішнього електрода всередині (в точці A) поля не створює, точніше, поле цього симетрично розміщеного заряду дорівнює нулеві. Отже поле в точці A створюється лише зарядом внутрішнього електрода.

Так як $d\phi = E_r dr$, то для різниці потенціалів можемо записати:

$$\begin{aligned}
 j_1 - j_2 &= \int_{j_1}^{j_2} dj = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \\
 &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{\tau dr}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \\
 &= \frac{t}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1}.
 \end{aligned}$$

Отже, ємність циліндричного конденсатора

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta\phi} = \frac{\Delta q}{\frac{\Delta q}{\Delta l 2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

або

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{R_2}{R_1}},$$

де R_1 і R_2 радіуси електродів конденсатора.

Як для плоского, так і для циліндричного конденсаторів ємність залежить від діелектричної проникності діелектрика, від розмірів електродів і відстані між ними. Змінюючи їх, можна одержувати конденсатори різної ємності.

Питання для контролю

1. Як розподілені надлишкові заряди, напруженість і потенціал поля в провіднику ?
2. Що відбувається з провідником в електричному полі? Як здійснити захист (екранування) від електричних полів ?
3. Що таке електроємність провідника ? Що таке конденсатор ?

4. Довести, що виокремлений провідник має меншу електроємність, ніж в системі з іншими провідниками.

5. Вивести формулу для електроємності плоского конденсатора.

6. Конденсатори яких конструкцій Ви знаєте ?

Допоміжна література

1. *Савельев Й. В.* Курс общей физики. Т. 2. – Москва: Наука, 1978, § 24-27.