

**ВАРІАНТ ПОСТАНОВКИ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ
"ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ОПОРІВ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ"
У КУРСІ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ**

У статті розглядається питання про експериментальне визначення питомих електричних опорів твердих діелектриків, наводиться приклад відповідної лабораторної роботи.

Ключові слова: діелектрик, об'ємний опір, поверхневий опір, об'ємний питомий опір, поверхневий питомий опір.

Програма курсу загальної фізики передбачає глибоке теоретичне висвітлення явищ та законів протікання електричного струму в металах, електролітах, напівпровідниках, а також у газах. Але в ній, на наш погляд, приділяється мало уваги вивченню електричного струму (постійного та змінного) в твердих діелектриках. Адже вони широко використовуються в різному електротехнічному та електронному обладнанні.

У лабораторних практикумах із загальної фізики містяться розроблені лабораторні роботи з вимірювання діелектричної проникності та діелектричних втрат в ізоляторах. У той же час описання методів визначення питомих об'ємного та поверхневого електричних опорів (відповідно ρ_v та ρ_s) можна знайти лише в спеціальній літературі.

З метою усунення вказаного недоліку ми розробили відповідну лабораторну роботу, яку доцільно запропонувати для виконання студентам фізико-математичних факультетів при вивченні ними курсу загальної фізики чи курсу фізики твердого тіла.

Метою виконання даної роботи є оволодіння методикою визначення питомого об'ємного та поверхневого опорів електроізоляційних матеріалів різного складу, а для її виконання необхідні наступні прилади та матеріали: універсальне джерело живлення УИП-1, автокомпенсаційний мікрвольтнано-амперметр Р325, комбінований цифровий прилад ЦЦ4300, комутаційний пристрій із системою масивних електродів, зразки досліджуваних твердих матеріалів.

Готуючись до виконання лабораторної роботи, студенти повинні за вказаною літературою вивчити теоретичний матеріал про класифікацію речовин за електричними властивостями, електричний опір ділянки ізоляції та його вимірювання, природу струму в діелектриках.

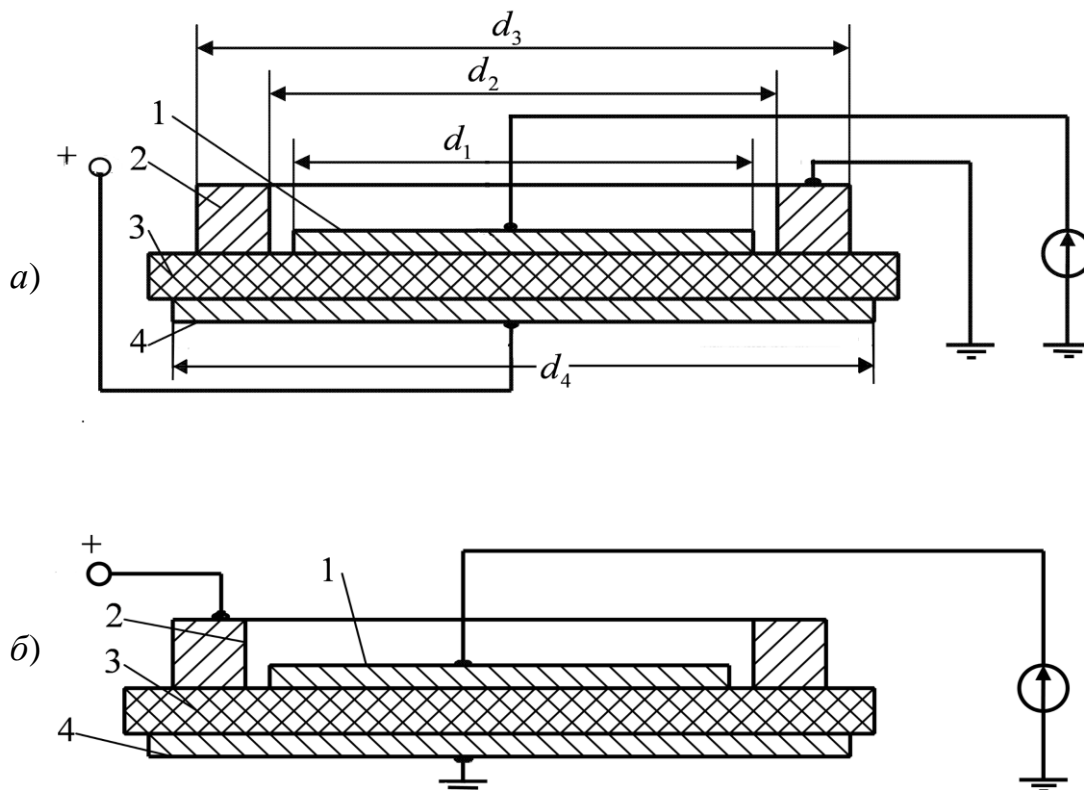
Для вимірювання ρ_v та ρ_s використовують систему із трьох електродів: вимірювального, високовольтного і охоронного. Наприклад, для плоского зразка (мал. 1, а) у випадку вимірювання об'ємного опору R_v охоронний електрод 2 має форму кільця, яке розміщене на поверхні концентрично з вимірювальним електродом 1. На іншому боці зразка 3 розміщений високовольтний електрод 4.

Охоронний електрод вирівнює поле між вимірювальним і високовольтним електродами і відводить поверхневий і об'ємний струми в краєвих частинах зразка на землю так, що вони не реєструються приладом. Поверхневий струм між охоронним і вимірювальним електродами також практично не протікає, бо вони мають приблизно однакові потенціали. Аналогічно застосовуються охоронні електроди і для трубчастих зразків.

У випадку вимірювання поверхневого опору R_s плоского зразка використовується той же вимірювальний електрод 1 (мал. 1, б), а роль високовольтного виконує кільцевий електрод 2. Охоронний електрод 4 має форму круга. Він відводить в землю об'ємний струм, а також поверхневий струм, що тече по краєвим поверхням зразка. Вимірювальним приладом, в даному випадку, реєструється лише поверхневий струм, що тече в кільцевому зазорі між електродами 2 та 1.

Окремо варто зупинитися на підготовці зразків твердих матеріалів та електродів до них для проведення вимірювань. Визначення опорів R_v і R_s твердих електроізоляційних матеріалів (крім плівок) проводять на плоских (круг, квадрат) або трубчастих зразках; визначити R_s можна і на стержневих зразках. Діаметр плоского круглого зразка (або сторону квадратного) вибирають в межах 25 – 150 мм, довжину трубчастого – 100 – 300 мм. У випадку використання стержневого зразка, його довжина повинна складати 50 – 100 мм. Плоскі і трубчасті зразки мають товщину стінки 0,5 – 2 мм. Товщину досліджуваних зразків визначають як середнє арифметичне вимірів у п'яти точках у місці розміщення вимірювального електрода.

Похибка вимірювання товщини не повинна перевищувати $\pm 1\%$. Різниця товщин зразка в різних місцях не повинна перевищувати 2% при товщинах, більших 0,5 мм, і 5% – при менших.



Мал. 1. Схеми зразків електродів для проведення вимірювань

Кількість зразків даного матеріалу повинна бути не менше трьох. Зразки мають бути не покоробленими, без тріщин, сколів, вм'ятин, задирок і забруднень. Поверхні зразків після механічної обробки повинні бути гладенькими, без вибоїн і подряпин.

Для досліджень стандартом дозволяється застосовувати електроди: масивні металеві, із фольги, осаджені методом впалювання чи напилення, графітові.

Фольгові електроди вирізають із олов'яної або алюмінієвої відпаленої фольги товщиною 5 – 20 мкм. Фольгові електроди можна з'єднувати із зразком трьома способами:

1. Притирається електрод до поверхні зразка за допомогою мастила (вазелін, трансформаторне або кремнійорганічне масло). Товщина шару мастила не повинна перевищувати 1 мкм. Ці електроди можна застосовувати для всіх твердих матеріалів, на які не діють вказані масла.

2. Припресовка з нагрівом – використовується для пластмас і плівок.

3. Фольгові електроди притискаються до поверхні зразка під тиском 10 кПа через гуму. Такі електроди застосовують для плоских листових матеріалів. Фольга в цьому випадку закріплюється на шарі гуми за допомогою спеціального тримача.

Електроди із осаджених матеріалів у вигляді плівок можуть бути виготовлені із срібла, золота, платини, міді або алюмінію. Відомий ряд методів нанесення таких плівок. Методом впалювання наносяться електроди із срібла. Для цього використовують спеціальну пасту, яка складається із вуглекислого срібла, плавня (вуглекислий вісмут та інші) і органічної зв'язки (розчин каніфолі в скипидарі). Пасту наносять на зразок за допомогою пензлика відповідно до форми і розмірів електродів. Зразок з нанесеною пастою висушують, а потім поміщують у муфельну піч. При нагріванні до кількох сотень градусів відбувається видалення органічних компонентів, розкладання вуглекислого срібла і виділення металевого срібла у вигляді плівки, що міцно тримається зразка. Методом вакуумного напилення можна наносити електроди із платини, золота, срібла, міді та алюмінію.

Графітові електроди можна одержати за допомогою графітової суспензії на лаку (епоксидному, шелаковому і т. п.) або графітового порошку.

Опір електрода із лакографіту не повинен перевищувати 100 Ом.

Електричний контакт з електродами із фольги, срібної пасту чи графіту здійснюється за допомогою масивних електродів із сталі, латуні чи міді, що мають форму і розміри (в плані) електродів, нанесених у вигляді плівок. У випадку застосування срібної пасту або розпиленого металу допускається безпосереднє припаювання проводу до електроду.

Розміри стандартних масивних електродів (мал. 1) при визначенні питомого об'ємного і питомого поверхневого опорів для плоских зразків дано в таблиці 1.

Розміри стандартних масивних електродів

d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , не менше, мм	d_4 , не менше, мм
100	104	124	125
75	79	99	100
50	54	74	75
25	29	49	50
10	14	34	35

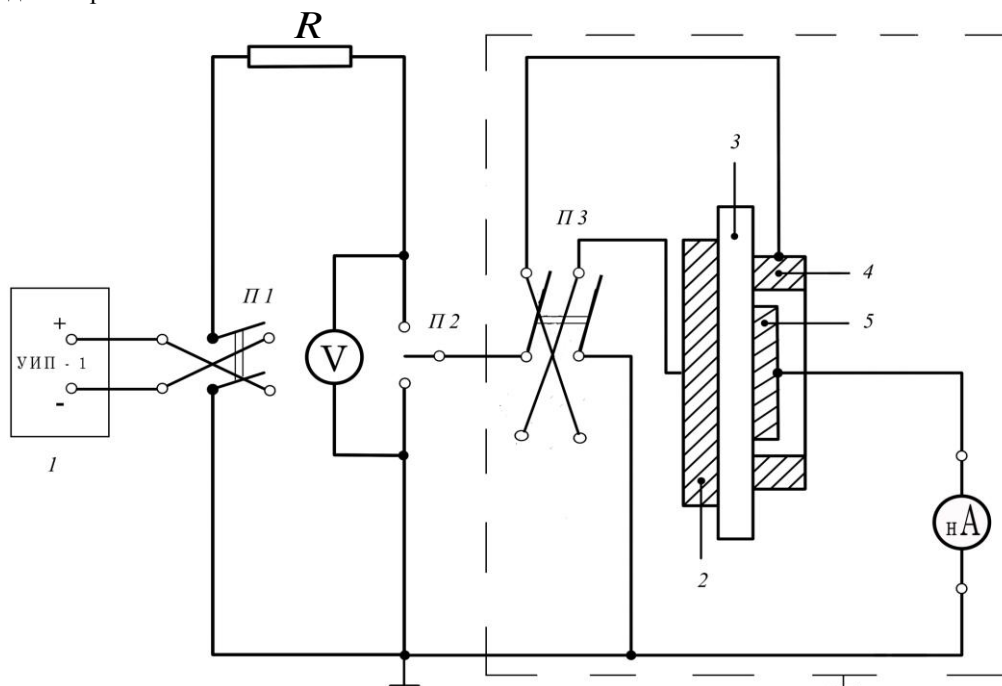
Зазор між вимірювальним і охоронним електродами повинен бути 2 мм; ширина охоронного електрода повинна бути не менше подвійної товщини зразка і в будь-якому випадку не менше 10 мм.

Опір зразка діелектрика можна виміряти прямо і посередньо. При прямих вимірюваннях застосовують лампові або напівпровідникові мегаомметри (тераомметри).

При посередніх вимірюваннях значення опору визначається за результатами вимірювань сили струму, що протікає в зразку, при відомому значенні прикладеної напруги.

При вимірюванні дуже малих струмів виникають значні труднощі, пов'язані із нестабільністю показів, впливом стану навколишнього середовища (температура, вологість і т. п.), флуктуаційними та іншими завадами. Тому вимірювання опору зразків високоякісних електроізоляційних матеріалів пов'язано з необхідністю ретельного екранування елементів установки, забезпечення стійкого режиму її роботи за рахунок стабілізації напруги живлення, температури. Особливу увагу слід звертати на якість і чистоту контактуючих елементів. Установку необхідно добре заземлити. Це потрібно не тільки для безпеки персоналу, але і для забезпечення стабільності показів.

Принципова схема установки для вимірювання питомого об'ємного та питомого поверхневого опорів діелектрика показана на мал. 2.



Мал. 2. Принципова схема установки для вимірювання питомого об'ємного та питомого поверхневого електричних опорів діелектрика

Досліджуваний зразок вмикається в коло (мал. 2) послідовно із захисним резистором R порядку 1 МОм, що обмежує силу струму у випадку пробоя діелектрика. Для вимірювання сили струму в установці використовується автокомпенсаційний мікрвольтноамперметр Р325 (нА), що складається з двох блоків: підсилювача Ф305.2 і вихідного приладу Р325/У. Стабілізована постійна напруга (0...600 В) на зразок подається від джерела напруги УИП-1. Напруга вимірюється за допомогою вольтметра (комбінований цифровий прилад Щ4300). Полярність напруги, що прикладається, можна змінювати за допомогою перемикача П1.


Дроти, що йдуть від амперметра до вимірювального електроду 5 екрановані, а екрани заземлюються. За допомогою перемикача П2 напругу певної полярності можна подати на досліджуваний зразок (верхнє положення) або його розрядити (нижнє положення).

Перемикач П3 змінює режим роботи установки:

- 1) вимірювання поверхневого опору R_S – верхнє положення;
- 2) вимірювання об'ємного опору R_V – нижнє.

Усі елементи схеми змонтовані на пластинці з полістиролу для забезпечення високого опору ізоляції. У свою чергу пластинка полістиролу прикріплена до заземленої металевої пластинки, а всі елементи кола закриваються кожухом із гетинаксу, внутрішні поверхні якого покриті мідною фольгою, що заземлюється. Згідно з правилами техніки безпеки установка автоматично відключається від джерела живлення при знятті захисного кожуха, коли змінюється режим роботи установки чи замінюється зразок (на мал. 2 блокувальні вимикачі не показано).

Порядок виконання роботи

1. Виміряти штангенциркулем або мікрометром товщину l запропонованих викладачем зразків діелектричних матеріалів, а також d_1 та d_2 (мал. 1) масивних електродів.
2. Вирізати за допомогою леза безпечної бритви електроди із алюмінієвої конденсаторної фольги за розмірами (в плані) масивних електродів.
3. Притерти електроди із фольги до поверхонь зразка за допомогою тонкого шару вазеліну або трансформаторного мастила так, щоб їх центри лежали на одній осі.
4. Покласти зразок притертим фольговим високовольтним електродом на відповідний масивний електрод 2 (мал. 2) комутаційного пристрою так, щоб центри цих електродів співпали.
5. Поставити на притерті електроди масивні електроди – охоронний (4) і вимірювальний (5) (по схемі вимірювання ρ_V), що приєднані провідниками з відповідними гніздами комутаційного пристрою.
6. Поставити перемикач П2 в положення "вимірювання", перемикач П3 в положення " R_V ".
7. Відключені від електричної мережі вольтметр (Щ4300) та мікрровольтаноамперметр Р325 приєднати, дотримуючись полярності, до відповідних гнізд комутаційного пристрою.
8. Закрити заземленим кожухом елементи схеми комутаційного пристрою.
9. Налаштований на вимірювання постійної напруги до 1000 В (кнопка "" повинна бути відтисненою, кнопки "U" та "1000" – натиснені, вимірювальна напруга подається на гнізда "*" та "U, R") цифровий комбінований прилад Щ4300 увімкнути в електричну мережу.
10. Поставити перемикач роду вимірюваної величини приладу Р325 в положення "I" (вимірювання сили струму). Перемикач між вимірювання поставити в положення 500 нА. Механічним коректором стрілку приладу поставити на нуль шкали. Увімкнути Р325 в електричну мережу.
11. Ручки ступінчастого та плавного регулювання напруги першого та другого джерел струму універсального джерела живлення УИП–1 поставити в крайні ліві положення. Вольтметр приладу УИП–1 приєднати до другого джерела струму (20–600В). Увімкнути УИП–1 в електричну мережу.
12. Прогріти прилади УИП–1, Р325 і Щ4300 протягом 15 хв.
13. При знеструмленому колі досліджуваного зразка діелектрика натиснути кнопку "измерение" вихідного приладу Р325/У і спочатку механічним коректором підсилювача Ф305.2, а потім електричними коректорами "грубо" і "тонко" Р325/У, поступово підвищуючи чутливість приладу, встановити його стрілку на нуль. Після цього перемикач між вимірювання мікрровольтаноамперметра знову поставити в положення 500 нА.
14. Приєднати комутаційний пристрій до джерела живлення УИП–1 (гнізда 20–600 В другого джерела струму). Виставити по вольтметру Щ4300 100 В. Виміряти силу об'ємного струму через зразок I_V при даній напрузі (в разі необхідності, поворотом ручки між вимірювання приладу Р325, збільшити його чутливість). Відлік по мікрровольтаноамперметру знімати через 60 с після того, як була прикладена напруга.
15. Дослідити залежність об'ємного струму I_V від прикладеної напруги (в межах 0–600 В). Стандарт рекомендує такий ряд випробовуючих напруг: 25; 50; 100; 250; 500; 1000; 2500 В. Для твердих і рідких діелектриків це звичайно 500 В. Допустимий струм у вимірювальному колі при відключеному зразку і при дослідній напрузі повинен бути не менше, ніж у 100 разів меншим струму, що протікає при підключеному зразку. При дослідженні неоднорідних матеріалів об'ємний струм I_V визначають при різній полярності прикладеної напруги (змінюється перемикачем П1). При розрахунках використовують середнє арифметичне значення I_V .
16. За вказівкою викладача дослідити залежність струму абсорбції від часу з моменту подачі напруги на зразок. На основі графіка залежності $i_{abc}(t)$ та виразу

$$i_{abc} = i_{abc.0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

визначити $i_{abc.0}$ – струм абсорбції в момент подачі напруги на зразок ($t = 0$) та τ – час релаксації струму абсорбції (час на протязі якого струм $i_{abc.0}$ зменшується в e разів)

17. Зменшити напругу джерела живлення УИП-1 до нуля. Від'єднати комутаційний пристрій від джерела живлення. Зняти кожух комутаційного пристрою.

18. Перемикач П2 на кілька хвилин перевести в положення "розрядка". Після цього його поставити в положення "вимірювання".

19. Перемикач П3 перевести в положення " R_S ". Закрити комутаційний пристрій кожухом.

20. Виміряти I_S при різних напругах, керуючись пунктами 13 – 15 порядку виконання роботи.

21. За законом Ома для ділянки кола $R_{is} = \frac{U}{I_{is}}$ визначити R_V та R_S при різних напругах.

22. За виразами $\rho_V = \frac{\pi(d_1 + d_2)^2 R_V}{16l}$ та $\rho_S = \frac{\pi(d_1 + d_2)}{d_2 - d_1} R_S$ обчислити ρ_V та ρ_S при різних напругах

(вирази одержати самостійно або за допомогою [4]).

23. Обчислити похибки визначення ρ_V і ρ_S через похибки вимірювальних приладів.

24. Побудувати графіки залежностей $\rho_V(U)$ і $\rho_S(U)$.

25. Пояснити одержані результати і зробити висновки. Порівняти одержані значення ρ_V і ρ_S для досліджуваних зразків з довідниковими.

Використані джерела

1. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: в 3 т. Т 2. Електрика і магнетизм / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик; за ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 2001. – С.156 – 161.
2. Болеста І. М. Фізика твердого тіла / І. М. Болеста. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. – С. 361 – 373.
3. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М.: Энергия, 1973. – С. 11 – 23, 41 – 51.
4. Казарновский Д.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий / Д.М. Казарновский, Б.М. Тареев. – Л.: Энергия, 1980. – С. 17 – 26, 28 – 36.

Rudenko M.P., Shovkoplyas V.S.

VARIANT OF PRODUCTION LABORATORY WORK "DEFINITION RESISTIVITY OF SOLID DIELECTRICS" IN THE COURSE OF GENERAL PHYSICS

The paper deals with the experimental determination of electrical resistance of solid dielectrics, is an example of an appropriate laboratory work.

Keywords: *insulator, surround resistance, surface resistance, volume resistivity, surface resistivity.*

Стаття рекомендована кафедрою фізики Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя.

Стаття надійшла до редакції: 09.04.2013