

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт

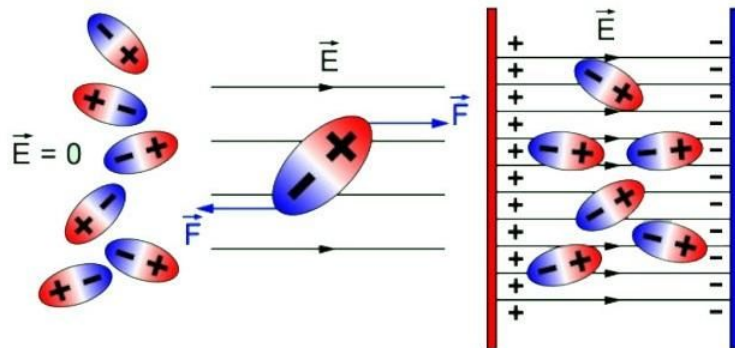
з дисципліни «Фізика діелектриків»

для студентів денної та заочної форми навчання

за спеціальністю

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка»



Затверджено

редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 15.02.2024

Харків
НТУ «ХПІ»
2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізика діелектриків» для студентів денної та заочної форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» / уклад.: Безпрозванних Г.В., Кессаєв О.Г., Москвітін Є.С. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2024. – 100 с.

Укладачі: Безпрозванних Г.В., Кессаєв О.Г., Москвітін Є.С.

Рецензент проф. М.І. Бойко

Кафедра електроізоляційної та кабельної техніки

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	4
Теоретичне пояснення до теми “Поляризація діелектриків”	5
Лабораторна робота 1. Дослідження залежності діелектричної проникності діелектриків від частоти	22
Лабораторна робота 2. Визначення видів поляризації та діелектричних втрат рідких неполярних діелектриках у широкому діапазоні частоти	28
Лабораторна робота 3. Дослідження діелектричних втрат у діелектриках візуалізацією залежності між напруженістю електричного поля та вектором поляризації	45
Лабораторна робота 4. Дослідження електропровідності твердих діелектриків	65
Лабораторна робота 5. Дослідження електричної міцності твердих діелектриків	82
Список рекомендованої літератури	100

ВСТУП

Діелектрики посідають важливе місце в сучасній електротехніці, електромеханіці, електроенергетиці, радіоелектроніці й інформаційних технологіях.

Для розуміння властивостей та кількісної характеристики діелектриків необхідно уявляти процеси, що відбуваються у них під впливом зовнішнього електричного поля, та визначити величини, що визначають перебіг цих процесів. Саме такий підхід реалізовано у методичних вказівках з лабораторного практикуму дисципліни "Фізика діелектриків".

У представлених методичних вказівках закладено системний підхід із сучасними уявленнями про фізичні процеси при взаємодії електричного поля з діелектриками, а саме: поляризацію, електропровідність, діелектричні втрати, електричну міцність з визначенням електричних параметрів, які пов'язані з відповідними процесами.

Дослідження основних фізичних процесів у діелектриках базується на застосуванні сучасної цифрової техніки, зокрема, вимірювача ємності і імітансу, портативного осцилографу.

Важливим моментом є візуалізація фізичного процесу поляризації неполярних та полярних діелектриків на підставі отриманих цифровим двоканальним портативним осцилографом у режимі реального часу залежностей між напруженістю електричного поля та вектором поляризації.

Застосування рефрактометричного методу у комплексі з вимірюваннями електричної ємності і тангенсу кута діелектричних втрат у діапазоні частоти від 100 Гц до 100 кГц дозволяє оцінити стан рідких діелектриків, у тому числі трансформаторної оливи — охолоджувальної та електроізоляційної рідини потужних силових трансформаторів.

Дослідження твердих тонких діелектриків в однорідному та неоднорідному електричному полі дозволяє визначити пробивну напругу.

Загальні вимоги до оформлення звітів з лабораторних занять.

Звіт повинен включати наступні складові:

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Схему вимірювання.
5. Розрахункові формули.
6. Експериментальні та розрахункові дані у вигляді таблиць, графічні залежності.
7. Порівняння отриманих даних з довідниковими.
8. Аналіз одержаних результатів.
9. Висновки.

I. Лабораторні роботи 1 , 2 за темою “ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ”

I.1. Загальні теоретичні положення до лабораторних робіт за темою на підставі макроскопічної теорії поляризації

I.1.1. Діелектрики, молекулярна будова, електричний дипольний момент

Діелектриком називається речовина, основною електричною властивістю є здатність поляризуватися в електричному полі. Характерною особливістю діелектриків є наявність пов'язаних позитивних і негативних зарядів в атомах, молекулах, з яких складається речовина.

З існуючих видів зв'язку для діелектриків (рис. I.1), які застосовуються в електроізоляційній, кабельній та оптоволоконній техніці, найбільш типовими є внутрішньо-молекулярний ковалентний (рис. I.1,б) неполярний та ковалентний полярний або гомеополярний іонний або гетерополярний донорно-акцепторний та міжмолекулярний Ван-дер-ваальсовий зв'язок (рис. I.1,в).

Ковалентний зв'язок - зв'язок двох атомів за рахунок утворення загальної електронної пари з антипаралельними спінами, локалізованої в між'ядерному просторі. За рахунок загальних електронів кожен атом намагається досягти повної валентної оболонки — октету.

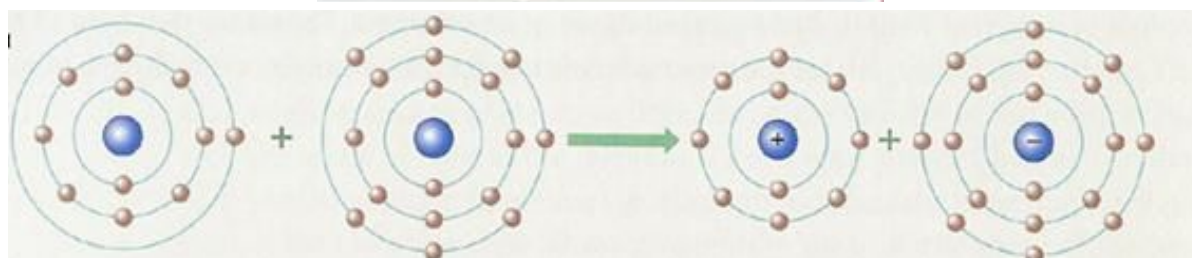
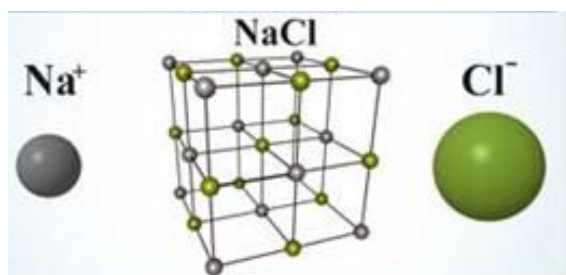
Іонний зв'язок (рис. I.1, а) можна розглядати як граничний випадок ковалентного зв'язку, при якому електронегативний елемент практично повністю приєднує до себе електронну пару і стає аніоном, а менш електронегативний атом віддає електрони і стає катіоном.

Вандерваальсова взаємодія складається з трьох типів слабких електромагнітних взаємодій:

1. За рахунок орієнтаційних сил, диполь-дипольного тяжіння між молекулами, що є постійними диполями (рис. I.1, в). Прикладом може служити хлористий водень в рідкому і твердому стані. Енергія такої взаємодії обернено пропорційна кубу відстані між диполями.

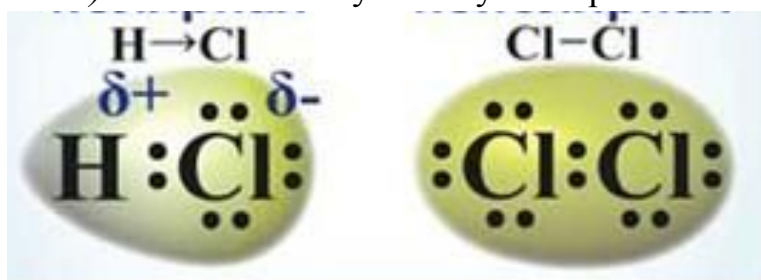
2. Дисперсійне тяжіння (Лондонівські сили, дисперсійні сили) зумовлено взаємодією між миттєвим та наведеним диполем. Енергія такої взаємодії обернено пропорційна шостому ступені відстані між диполями.

3. Індукційне тяжіння (поляризаційне тяжіння) - взаємодія між постійним диполем та наведеним (індукованим). Енергія такої взаємодії обернено пропорційна шостому ступені відстані між диполями.



Атом натрію Na Атом хлору Cl Іон натрію Na⁺ Іон хлору Cl⁻

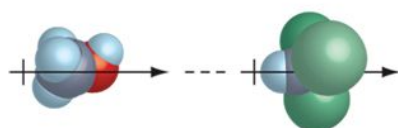
а) іонний зв'язок у молекулі хлористого натрію



Полярний

Неполярний

б) ковалентний полярний зв'язок у молекулі хлористого натрію (ліворуч) та ковалентний неполярний у молекулі хлору (праворуч)



в) Ван-дер-Ваальсовий зв'язок - міжмолекулярна диполь-дипольна взаємодія між метиловим спиртом CH₃OH (ліворуч) та хлороформом CHCl₃ (праворуч)

Рисунок 1.1 – Ілюстрація утворення внутрішньомолекулярного та міжмолекулярного зв'язків

Сили зв'язку визначають як будову та основні властивості речовини, так й наявність хаотично чи впорядковано орієнтованих електричних

моментів у мікро- та макроскопічних об'ємах речовини.

Електричний момент μ з'являється в системі з двох однакових за значенням та різнойменних за знаком електричних зарядів $\pm q$, розташованих на деякій відстані (плечі) l один від одного, і визначається співвідношенням

$$\mu = (q) \cdot l \quad , \text{ Кл}\cdot\text{м (I.1)}$$

Позасистемною одиницею є Дебай: $1\text{Д}=3,33\cdot 10^{-30}$ Кл·м.

Таку систему зарядів прийнято називати дипольною молекулою, а утворену цією системою зарядів структуру – диполем.

Ковалентний зв'язок виникає при об'єднанні атомів у молекули, в результаті якого відбувається узагальнення валентних електронів та доповнення зовнішньої електронної оболонки до сталого стану (рис. I.1, б).

Молекули з ковалентним неполярним зв'язком виникають при об'єднанні однойменних атомів типу водню H_2 , кисню O_2 , хлору Cl_2 , вуглецю C , сірки S , кремнію Si і т.п. та мають симетричну будову. Внаслідок збігу центрів позитивного та негативного зарядів електричний момент молекули дорівнює нулю, молекула неполярна та речовина (діелектрик) – неполярна.

Якщо молекули з ковалентним зв'язком утворюються з різнойменних атомів за рахунок узагальнення пар валентних електронів, наприклад, води H_2O , метану CH_4 , хлор-метану CH_3Cl , відсутність або наявність електричного моменту залежатиме від взаємного розташування атомів відносно один одного. При симетричному розташуванні атомів і, отже, збігу центрів зарядів – молекула буде неполярною. При несиметричному розташуванні за рахунок усунення центрів зарядів на певну відстань виникає електричний момент, молекула називається полярною та речовина (діелектрик) – полярною.

Незалежно від того, полярний або неполярний діелектрик, наявність електричного моменту в молекулах призводить до виникнення власного електричного поля в кожному мікроскопічному обсязі речовини. При хаотичній орієнтації електричних моментів молекул за рахунок їх взаємної компенсації сумарне електричне поле у діелектрику дорівнює нулю. Якщо електричні моменти молекул орієнтовані переважно в одному напрямку, то електричне поле виникає у всьому обсязі речовини.

Таке явище спостерігається в речовинах із мимовільною (спонтанною) поляризацією, зокрема, у сегнетоелектриках (**активних діелектриках**).

Іонний та донорно-акцепторний зв'язок виникають при утворенні речовини з різнойменних атомів. При цьому атом хімічного елемента віддає, а інший приєднує або захоплює електрон. В результаті утворюються два іони, між якими виникає електричний момент.

Таким чином, за будовою молекул можна розділити діелектрики на

три групи:

- **неполярні діелектрики**, електричний момент молекул яких дорівнює нулю;

- **полярні діелектрики**, електричний момент молекул у яких відмінний від нуля;

- **іонні діелектрики**, у яких електричний момент виникає між іонами хімічних елементів, що становлять речовину.

Наявність електричних моментів у діелектриках, незалежно від причин їх виникнення, визначає їх основну властивість – здатність поляризуватися у електричному полі.

1.1.2. Макроскопічна теорія поляризації діелектриків

За відсутності зовнішнього електричного поля в діелектриках, за умови відсутності мимовільної поляризації, у кожному елементі об'єму через довільну орієнтацію електричних моментів молекул та їх взаємної компенсації сумарний електричний момент дорівнюватиме нулю (рис. 1.2). Під впливом електричного поля відбувається зміщення пов'язаних зарядів щодо стійких положень на відстані, порівнянні з внутрішньоатомними, тобто відбувається орієнтація пов'язаних зарядів зовнішнім електричним полем. Це явище називається поляризацією.

Упорядкування розташування пов'язаних зарядів обумовлює, що кожен макроскопічний елемент об'єму матиме електричний момент \vec{p}_v , відмінний від нуля. Цей момент дорівнює сумі всіх електричних моментів молекул цього об'єму

$$\vec{p}_v = \sum_i \vec{p}_i, \quad (I.2)$$

де $\vec{p}_i = \vec{\mu}$ – дипольний момент молекули.

Дипольний момент одиниці об'єму являє собою поляризованість \vec{P} (**вектор поляризації**)

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_v}{V} = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{V}, \quad (I.3)$$

де V – об'єм поляризованого діелектрика.

Одиниця виміру поляризованості P – Кл/м².

З розмірності витікає, що поляризованість дорівнює поверхневій густині σ' зв'язаного заряду на поверхні поляризованого діелектрика.

Таким чином, **електрична поляризація – це стан речовини, при якому електричний момент деякого об'єму відмінний від нуля** (рис. 1.2).

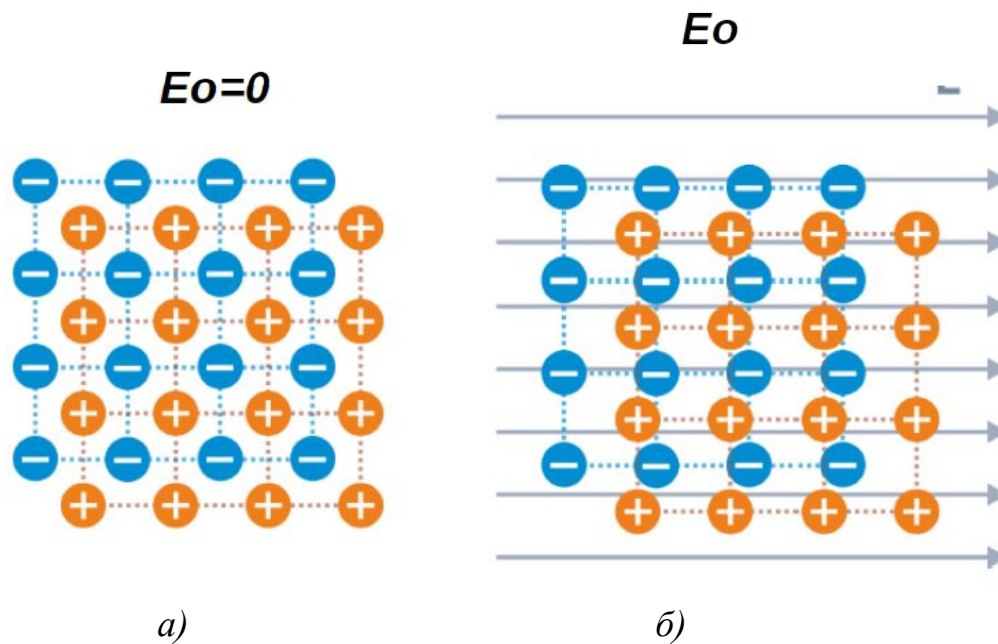


Рисунок І.2 – Схематичне зображення процесу поляризації при знаходженні твердого діелектрику кристалічної структури у зовнішньому електричному полі
 а) за відсутності електричного поля б) за наявності електричного поля

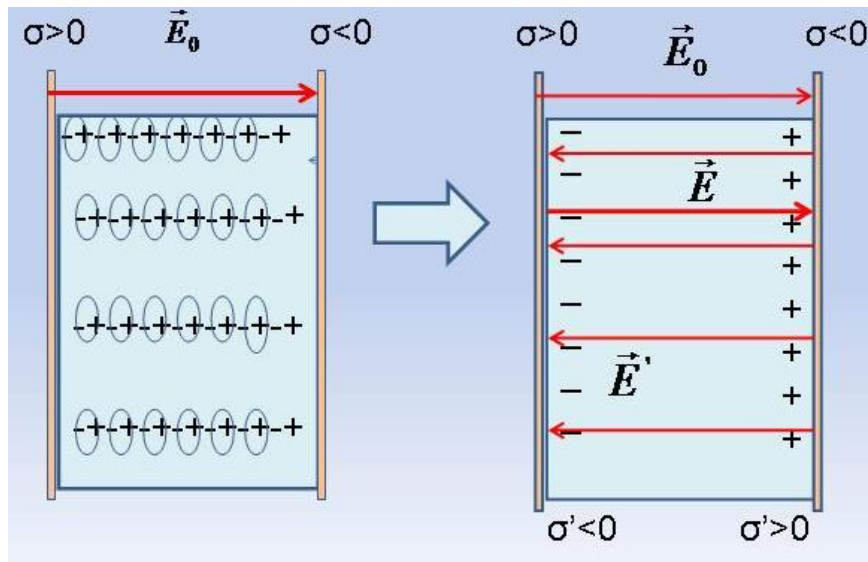
В результаті орієнтації молекул в об'ємі діелектрика виникає внутрішнє електричне поле з напруженістю E' (рис. І.3), спрямоване проти зовнішнього поля E_0 . В результаті сумарне електростатичне поле E у діелектрику буде дорівнювати:

$$\dot{E} = \dot{E}_0 - \dot{E}' . \quad (I.4)$$

В області слабких електричних полів для більшості пасивних діелектриків (електрофізичні властивості не залежать від зовнішнього електричного поля) зв'язок між вектор поляризації P та електростатичним полем у діелектрику можна вважати лінійним:

$$\dot{P} = \chi \epsilon_0 \dot{E} \quad , (I.5)$$

де χ – діелектрична сприйнятливість (безрозмірний параметр). Для вакууму $\chi = 0$, для більшості діелектриків $\chi = 0,5 \dots 10$;
 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала.



σ – густина поверхневого заряду на поверхні металевого електроду та σ' – густина зв'язаного заряду на поверхні поляризованого діелектрика

Рисунок 1.3 – Пояснення виникнення внутрішнього поля у діелектрику при знаходженні у зовнішньому електростатичному полі

Враховуючи (1.5), формулу (1.4) можна записати у вигляді:

$$(1 + \chi) = E_0 / E, \quad (1.6)$$

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}, \quad (1.7)$$

де ε – діелектрична проникність – макроскопічна характеристика, яка кількісно оцінює здатність діелектрика поляризуватися, та показує, у скільки разів електростатичне поле послаблюється у діелектрику у порівнянні з вакуумом.

При розгляді двох однакових за розмірами плоских конденсаторів (рис. 1.3) при визначенні ємності за умови, що між обкладками одного з них знаходиться діелектрик, а іншого – вакуум, можна показати, що ємність конденсатора з діелектриком C_d за рахунок поляризації більше, ніж ємність конденсатора C_0 без діелектрика, з вакуумом, де немає зв'язаних зарядів, тобто відсутній процес поляризації:

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_0}. \quad (1.8)$$

Таким чином, діелектрична проникність показує, у скільки разів збільшується ємність конденсатора з діелектриком у порівнянні з конденсатором з вакуумом того ж розміру, що і без діелектрика.

Ємність плоского конденсатора розраховується за формулою

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{h}, \Phi \quad (I.9)$$

де S – площа обкладок конденсатора, h – товщина діелектрика.

З (I.9) отримуємо:

$$\varepsilon = \frac{Ch}{\varepsilon_0 S}. \quad (I.10)$$

Значення діелектричної проникності ε можна визначити експериментально за результатами вимірювань ємності конденсатора за умови відомої площі обкладок конденсатора S та товщини діелектрика h для діелектричного матеріалу, який використовується у даному конденсаторі. Власне, такі вимірювання та розрахунки проводяться у лабораторній роботі за темою “Поляризація діелектриків”.

I.1.3. Види поляризації діелектриків

Поляризація діелектриків відбувається як на постійному, так і у змінному електричному полі за рахунок періодичної зміни відповідно до частоти f зовнішнього поля напрямку вектора напруженості поля. Залежно від природи частинок, що становлять матеріал та сил зв'язку між ними, у діелектриках спостерігаються різні види або механізми поляризації. Основними механізмами поляризації є:

1. електронна,
2. іонна,
3. електронно-релаксаційна, іонно-релаксаційна,
4. дипольно-релакційна,
5. теплова або релаксаційна;
6. резонансна;
7. спонтанна;
8. міграційна.

Електронна поляризація виникає за рахунок пружного зміщення та деформації електронних оболонок щодо ядер атомів та (або) іонів (рисунок I.4). При цьому виникає асиметрія зарядів - зміщення центрів позитивного та негативного зарядів, що обумовлює появу електричного дипольного моменту, тобто речовина поляризується.

Оскільки сили міжатомного зв'язку значні, це обумовлює зсув центрів зарядів на незначну відстань в порівнянні з внутрішньоатомними розмірами (порядку $(10^{-13} - 10^{-15})$ м). Відповідно, поляризація відбувається миттєво: час встановлення електронної поляризації $\tau \sim 10^{-15}$ с спостерігається при частотах зовнішнього змінного поля до 10^{15} Гц (у оптичному діапазоні).

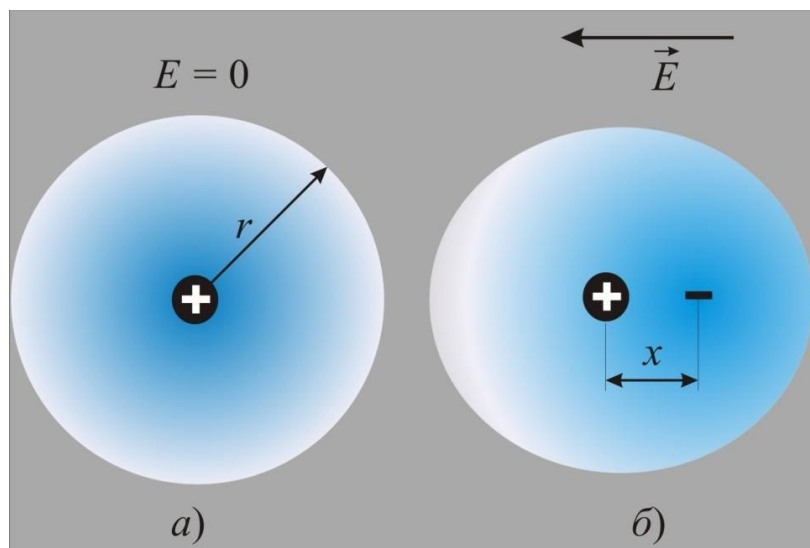


Рисунок I.4 – Схематичне пояснення механізму встановлення поляризації електронного зміщення

Електронна поляризація притаманна всім діелектрикам і є єдиним видом неполярних діелектриків ідеальної структури. Для діелектриків з електронною поляризацією має місце наближена рівність діелектричної проникності квадрату показника заломлення світла n : $\epsilon \approx n^2$, яку можна використовувати для оцінки ступеня полярності речовини.

Неполярні діелектрики, для яких характерна тільки електронна поляризація (наприклад, поліетилен, поліпропілен, поліетилентерефталат, полістирол, парафін, сірка та ін.) мають за нормальних умов типові значення діелектричної проникності $\epsilon = 1,9 \dots 2,7$.

Іонна поляризація обумовлена пружним зміщенням іонів щодо положення рівноваги та характерна для діелектриків з іонною структурою та іонним типом хімічного зв'язку (рисунок I.5).

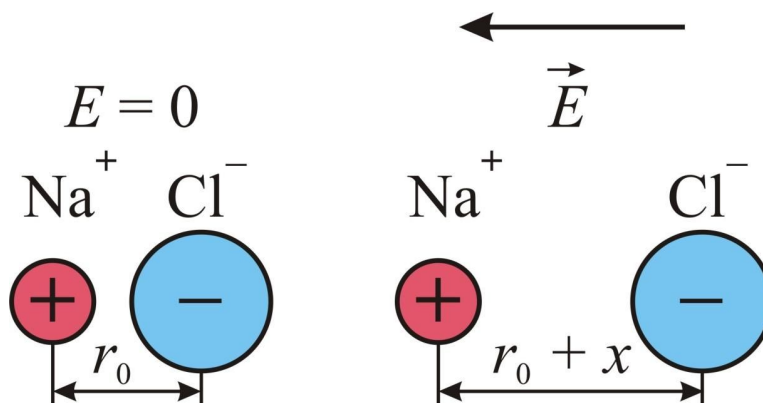


Рисунок I.5 – Схематичне пояснення механізму встановлення поляризації іонного зміщення

Зміщення іонів відбувається у кристалічній ґратці, що визначає значення зміщення x менше 0,5 нм. Час встановлення іонної поляризації $\tau \sim 10^{-13}$ с. Такий вид поляризації встигає встановлюватися при частотах зовнішнього поля до 10^{13} Гц (інфрачервоному діапазоні). Цей вид поляризації також вважається миттєвим. Іонні діелектрики з щільною упаковкою іонів (наприклад, кварц, корунд, слюда та ін.), в яких є електронна та іонна поляризації, мають типові значення діелектричної проникності $\epsilon = 4 \dots 10$, а кристали, що містять іони титану, можуть мати діелектричну проникність навіть більше 100. Для іонних діелектриків з нещільною упаковкою діелектрична проникність знаходиться у тому ж діапазоні, але в них можлива також релаксаційна поляризація, що збільшує значення ϵ .

Інші види поляризації прийнято називати уповільненими або релаксаційними. Це означає, що процес поляризації спочатку, тобто в момент прикладання зовнішнього поля або зміни його фази, відбувається швидко, а потім уповільнюється і фактично описується за експоненціальним законом. При підвищених і високих частотах ці види поляризації не встигають слідувати за зміною зовнішнього поля. Отже, не приймають участі у процесі поляризації діелектрика, тобто відсутні.

Основна модель, що використовується для розгляду особливостей релаксаційної поляризації, включає наявність двох рівноцінних з енергетичної точки зору і розділених потенціальним бар'єром положень рівноваги у відсутності зовнішнього поля для частинок, що приймають участь у цій поляризації (рис. І.6) і термоактиваційний характер переходів з одного положення рівноваги в інше, що здійснюються за рахунок енергії теплових коливань.

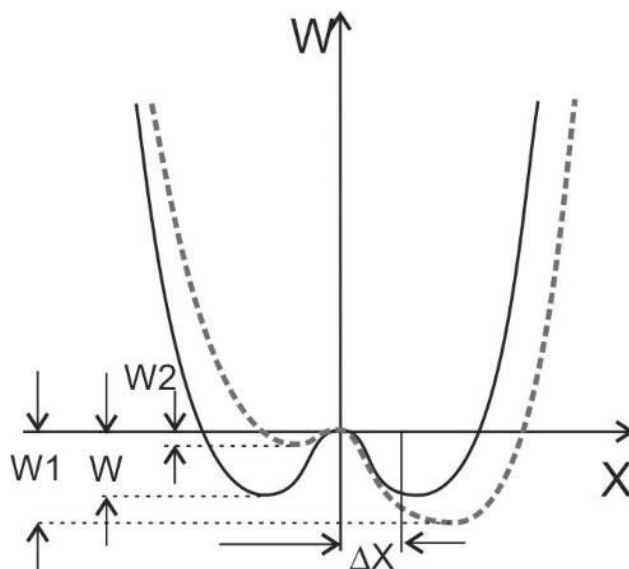


Рисунок І.6 – Пояснення змінення потенційної енергії зарядженої частинки діелектрику при знаходженні у зовнішньому електростатичному полі

Електронно-релаксаційна поляризація виникає в діелектриках, що мають дефекти структури у вигляді відсутніх атомів або що знаходяться у між-вузлах, а також за наявності чужорідних атомів. У місці дефекту з'являється електрон або дірка, що належать сусіднім іонам, і тому слабо з ними пов'язані. Ці заряди легко зміщуються зовнішнім полем, що призводить до асиметрії електричних зарядів та виникнення електронно-релаксаційної поляризації. Час встановлення такої поляризації або час релаксації становить $\tau \sim (10^{-7} \dots 10^{-11})$ с.

Іонно-релаксаційна поляризація виникає у діелектриках з нещільною упаковкою структурних елементів кристалічної ґратки (частіше всього це домішкові іони, які за рахунок теплового збудження можуть переходити з одного між-вузла кристалічної ґратки до іншого). В результаті іони слабо пов'язані між собою і можуть зміщуватися зовнішнім полем на відстані, що перевищують постійну ґратки. Час встановлення такого виду поляризації (іонно релаксаційний чи тепловий іонний) суттєво залежить від температури і становить приблизно $10^{-5} \div 10^{-8}$ с. Цей вид поляризації притаманний неорганічним діелектрикам (наприклад, склу).

Дипольно-релаксаційна поляризація виникає у іонних полярних діелектриках, які складаються з дипольних молекул. Заряди в диполях досить сильно пов'язані один з одним, тому на їхню орієнтацію потрібні значні витрати енергії зовнішнього поля та більше часу на поляризацію. Час встановлення поляризації визначається типом диполів, силами зв'язку між іонами та знаходиться у діапазоні $\tau \sim (10^{-6} \dots 10^{-10})$ с.

Теплова (дипольно-релаксаційна) поляризація: у разі слабого зв'язку між частинками на поляризацію впливає тепловий рух частинок. Під дією електричного поля за рахунок теплової енергії при зміщенні частинки долають потенційні бар'єри. Ці зміщення достатньо значні: $\geq 0,5$ нм. Після виключення поля внаслідок впливу теплового руху, що дезорієнтує частинки, система повертається у початковий стан більш повільно $\tau \sim (10^{-6} - 10^{-10})$ с. Проявляється у радіочастотному діапазоні.

У деяких діелектриках відбувається мимовільна орієнтація диполів (спонтанна поляризація), що спостерігається всередині окремих областей (доменів) за відсутності електричного поля. Спонтанна поляризація має місце у матеріалів, званих сегнетоелектриками. У відсутності електричного поля електричні моменти доменів спрямовані хаотично та компенсують один одного. При накладенні зовнішнього поля моменти орієнтуються по полю, призводячи до аномально великих значень діелектричної проникності.

Міграційну, або об'ємно-зарядну, поляризацію відносять до макроскопічної поляризації. Вона характерна для неоднорідних діелектриків. Накопичення електричних зарядів на межах неоднорідностей (шарів, домішок) призводить до об'ємно-зарядної поляризації. Ця поляризація суттєво підвищує електричну ємність конденсатора, що містить

неоднорідний діелектрик. Величина зміщення зарядів при міграційній поляризації може становити макроскопічну величину: приблизно 1 мкм. Час встановлення $\tau \sim (10^{-5} - 10^{-4})$ с. Проявляється у області низької частоти.

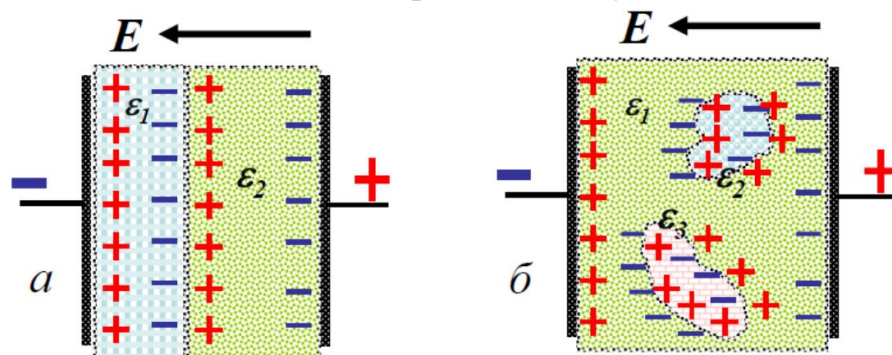


Рисунок І.7 – Схематичне пояснення механізму встановлення міграційної поляризації у неоднорідних діелектриках

У реальному діелектрику може бути кілька видів поляризації з різним часом поляризації τ . Якщо у діелектрику спостерігаються всі види поляризації, що відбуваються незалежно один від одного, то ступінь поляризації (поляризованість) i , відповідно, діелектрична проникність, визначатися сумою вкладів всіх видів поляризації (адитивний закон, що виконується у області слабких електричних полів): $\epsilon_{нч}$ (міграційна), $\epsilon_{рч}$ (теплова релаксаційна), $\epsilon_{іч}$ (іонного зміщення), $\epsilon_{опт}$ (електронного зміщення)

$$\epsilon = \epsilon_{нч} + \epsilon_{рч} + \epsilon_{іч} + \epsilon_{опт} \quad (I.11)$$

Зі зростанням частоти зовнішнього поля частина поляризаційних процесів, що встигають слідувати за зміною поля, робитиме внесок у значення діелектричної проникності ϵ . Процеси, що відстають від зміни електричного поля, не впливатимуть на значення діелектричної проникності ϵ за рахунок зменшення вкладу у поляризаційний процес повільних видів поляризації.

Таким чином, діелектрична проникність ϵ є частотне-залежним параметром, тобто залежить від частоти. Цю залежність називають дисперсією діелектричної проникності. У спрощеному вигляді для діелектрика з усіма видами поляризації представлена на рис.І.8 з відповідними позначеннями ϵ в залежності від частоти прояву.

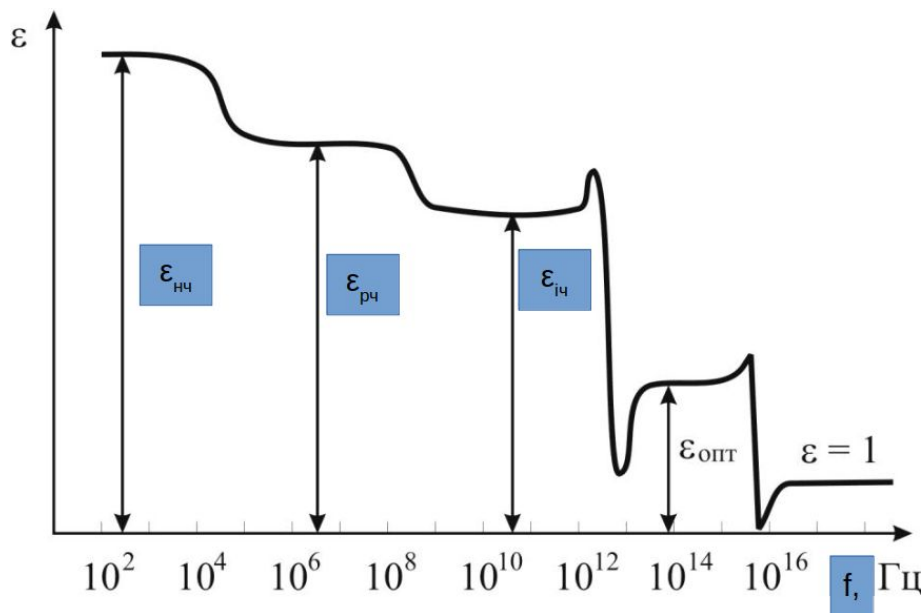


Рисунок І.8 – Дисперсія діелектричної проникності

Зі зростанням частоти поляризаційні процеси починають відставати від зміни фази вектора напруженості зовнішнього поля. При певній частоті (резонансній), коли час встановлення поляризації стає меншим за півперіод частоти зовнішнього поля, орієнтація пов'язаних зарядів припиняється. В результаті діелектрична проникність ϵ зменшується (рис. І.8, рис. І.9) спочатку на величину $\epsilon_{нч}$, потім – на $\epsilon_{рч}$ і т.п. При цьому у діелектрику спостерігаються втрати електричної енергії (нижній рисунок на рис. І.9).

При частотах вище 10^{15} Гц ϵ стає рівною діелектричної проникності вакууму $\epsilon_{вак}$, де немає зарядів і, отже, не може бути поляризації. Якщо в досліджуваному діелектрику відсутній один або кілька видів поляризації, то на частотній залежності не буде одного або декількох сходинок.

На рис. І.9 поставлено у відповідність частотну залежність дійсної частини комплексної діелектричної проникності втратам електричної енергії (уявній частині комплексної діелектричної проникності), що відбуваються з проявом характерних максимумів на відповідній частоті при резонансі уповільнених видів поляризації (міграційної та дипольної теплової) та миттєвих.

Необхідно відмітити, що при релаксаційній, спонтанній та міграційній поляризації також мають місце витрати електричної енергії, що розсіюється у діелектриках у вигляді тепла.

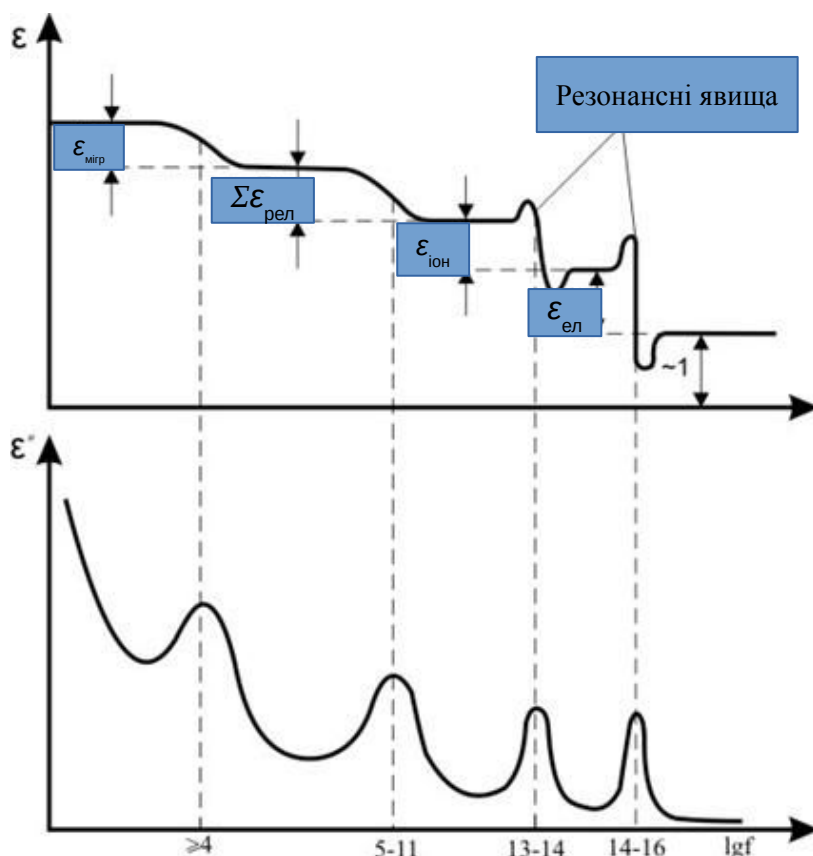


Рисунок І.9 – Втрати електричної енергії при резонансі відповідних видів поляризації у діелектриках [3]

Наприклад, в поліетилені, як і в інших насичених вуглеводнях, кожен атом вуглецю утворює чотири ковалентні зв'язки, направлені до кутів правильного тетраедра. Нормальний тетраедричний кут між зв'язками дорівнює $109^{\circ}28'$, і тому випрямлений ланцюг макромолекули поліетилену виглядає як змійка (рис. І.10). Розтягнути таку змійку, не зруйнувавши її, не можна, оскільки ковалентні зв'язки мають певну довжину і спрямованість. Щоб змінити валентні кути ($109^{\circ}28'$) або довжину зв'язків (0,154 нм), потрібна досить висока енергія. Проте ковалентні зв'язки між атомами вуглецю володіють циліндричною симетрією; при повороті однієї частини молекули відносно іншої навколо осі С–С перекриття електронних оболонок не змінюється, отже, не змінюється міцність зв'язків. Тому молекулярні “змійки” можуть згинатися за рахунок вільного обертання у вуглецевих вузлах без зміни валентних кутів чи довжини зв'язків і без затрати енергії.

Міжмолекулярна взаємодія обмежує гнучкість полімерних макромолекул.

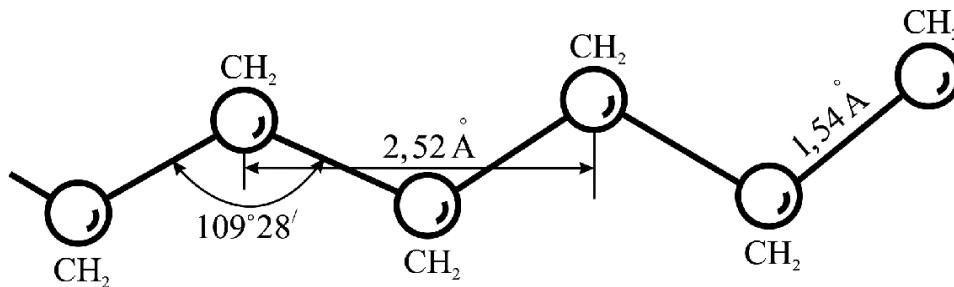


Рисунок І.10 – Фрагмент макромолекули неполярного діелектрику поліетилену

Теплові поштовхи не в стані викликати рух всієї макромолекули в структурі полімеру. Проте завдяки гнучкості молекулярних ланцюгів в тепловому русі можуть брати участь окремі ділянки макромолекули, які називають сегментами. Чим менший розмір сегментів, здатних до самостійного переміщення, тим більша гнучкість макромолекули. У лінійних полімерів сегменти зазвичай складаються з декількох десятків ланок. Сегментальна рухливість молекулярних ланцюгів є однією з причин релаксаційних діелектричних втрат у полімерах.

Діелектрична проникність є комплексною, частотне-залежною, величиною ϵ^* (формула (І.12)), дійсна частина $\epsilon' = \epsilon'$ котрої характеризує процес поляризації, уявна ϵ'' (формула (І.13)) – коефіцієнт екстинкції, тобто втрат електричної енергії у діелектрику: добуток діелектричної проникності та тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg} \delta$.

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega), \quad (І.12), \quad \epsilon''(\omega) = \epsilon'(\omega) \cdot \text{tg} \delta. \quad (І.13)$$

І.1.4. Діелектричні втрати

Втратами електричної енергії в діелектрику або діелектричними втратами називають потужність, що розсіюється у вигляді тепла в діелектрику, поміщеному в електричне поле, тобто. енергію зовнішнього електричного поля, що витрачається на нагрівання діелектрика за одну секунду.

Це означає, що діелектрик в електричному полі нагрівається, на що витрачається енергія поля. Звідси і виник термін «діелектричні втрати».

При знаходженні діелектрика в постійному електричному полі у ньому протікає струм наскрізної провідності або струм витоку. Діелектрик не є ідеальним з точки зору відсутності вільних носіїв зарядів. Відповідно до закону Джоуля-Ленца, перебіг струму призводить до виділення тепла та нагрівання діелектрика, тобто. до незворотних втрат енергії зовнішнього поля.

У діелектрику, що знаходиться у змінному електричному полі, існує дві причини виникнення незворотних втрат енергії електричного поля:

- втрати за рахунок протікання струму наскрізної провідності;

- втрати за рахунок наявності уповільнених видів поляризації.

Якщо поляризаційні процеси встигають слідувати за зміною поля, то у першу чверть періоду енергія витрачається на орієнтацію (зміщення) зарядів, що рівнозначно нагріванню діелектрика. При поверненні у вихідний стан, тобто у наступну чверть періоду, накопичена енергія зменшується, що рівнозначно охолодженню діелектрика. За цей період нагрівання компенсується охолодженням і, таким чином, необоротних втрат електричної енергії немає. Такий процес характерний для швидких видів поляризації. На низьких частотах – для практично всіх видів поляризації.

Якщо поляризаційні процеси відстають від зміни поля (рис. I.11), то час на нагрівання діелектрика виявляється більшим, ніж час на охолодження. Діелектрик нагрівається, існують незворотні втрати енергії зовнішнього поля. Такий процес притаманний для уповільнених видів поляризації.

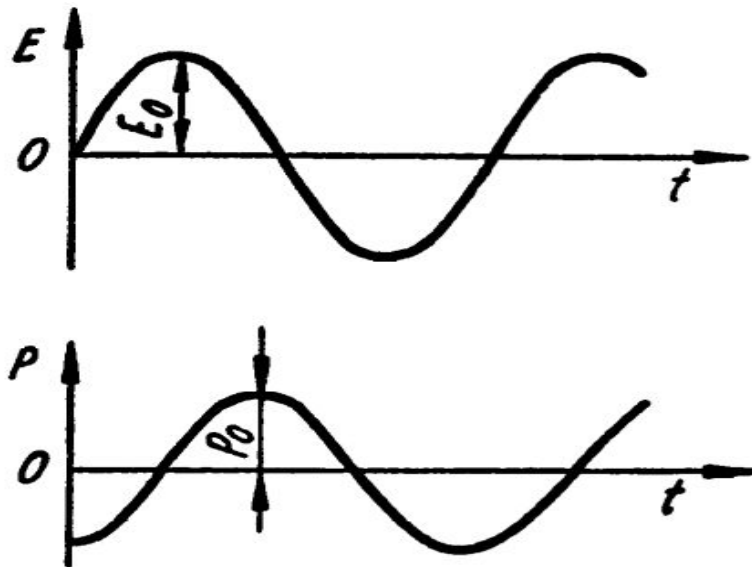


Рисунок I.11 – Типовий характер змінення у часі напруженості електричного поля та вектора поляризованості для випадку уповільнених видів поляризації: спостерігається запізнювання вектора поляризації

При поляризації відбувається зміщення (рух) зв'язаних зарядів. Це дає підставу розглядати процес поляризації як перебіг струмів. Якщо при протіканні струму діелектрик не нагрівається, отже, це суто реактивний струм, що характерно для миттєвих видів поляризації. У таких видах поляризації вектор поляризації не відстає від вектора напруженості електричного поля.

При уповільнених видах поляризації, що відстають від зміни поля (рис. I.11), діелектрик нагрівається. Такі процеси можна характеризувати як перебіг у діелектрику активного струму.

Подання поляризаційних процесів у вигляді протікання активних і

реактивних струмів дозволяє кількісно характеризувати втрати енергії у діелектрику.

Для кількісної оцінки втрат користуються параметром, який називається тангенсом кута діелектричних втрат – $tg\delta$.

За умови відсутності у діелектрику втрат електричної енергії зсув фази між прикладеною змінною напругою U та струмом I_r становить 90° (рис. I.12, ліворуч). Реактивний струм I_r випереджає по фазі напругу U на 90° .

Наявність втрат електричної енергії у діелектрику, що знаходиться у змінному електричному полі, призводить до появи активного струму I_a (рис. I.12, праворуч).

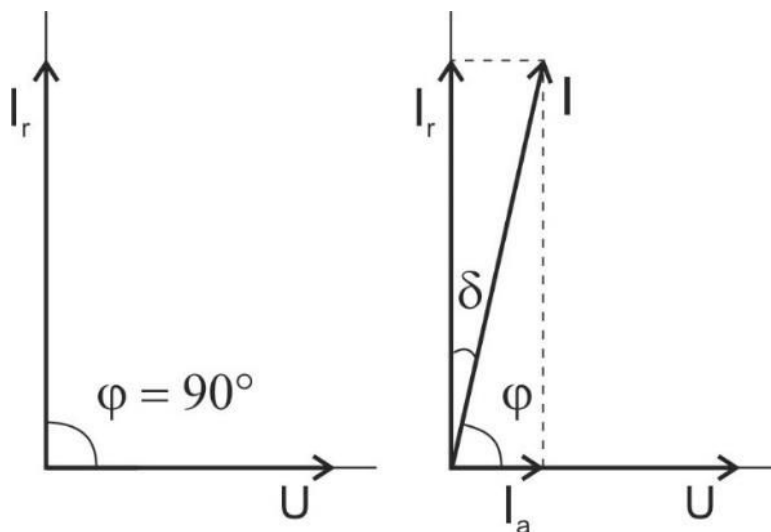


Рисунок I.12 – Векторна діаграма напруги та струмів у діелектрику при знаходженні у зовнішньому змінному електричному полі

Активний струм складається з наскрізного струму (струму витоку) та активного струму, обумовленого уповільненими видами поляризації, що відстають від зміни поля (див. рис. I.11) та збігається по фазі з напругою. Повний струм I зміщено по фазі щодо напруги на кут φ .

Кут δ , що доповнює кут зсуву фаз φ між струмом і напругою до 90° , називається кутом діелектричних втрат.

Відповідно до векторної діаграми тангенс кута діелектричних втрат визначається на підставі:

$$tg\delta = I_a/I_p, \quad (I.14)$$

З формули (1.14) випливає: чим більший активний струм I_a , тим більше δ і $tg\delta$ а, отже, більше втрати у діелектрику.

Таким чином, за значенням $tg\delta$ можна кількісно оцінювати втрати електричної енергії у діелектриках.

Для високоякісних діелектриків $tg\delta < 10^{-4}$ (для сухого повітря у неіонізованому стані $tg\delta \approx 10^{-8}$).

Оскільки поляризаційні процеси залежать від частоти зовнішнього електричного поля, то і втрати, тобто $tg\delta$, залежатимуть від частоти.

У діелектрику, що знаходиться у постійному електричному полі, втрати визначаються тільки струмом наскрізної провідності. Оскільки в цьому випадку не існує реактивного струму, параметр $tg\delta$ не має сенсу. У діелектрику, що знаходиться у змінному електричному полі, частотна залежність $tg\delta$ має вигляд, представлений на рис. I.13. Для наочності на представлено фрагмент частотної залежності ϵ .

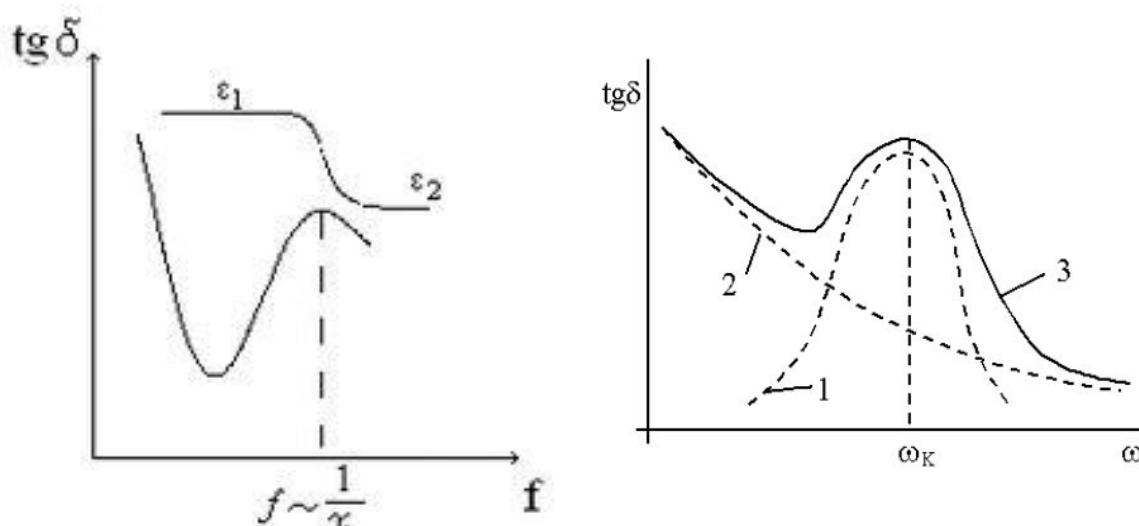


Рисунок I.13 – Частотна залежність $tg\delta$

1 – втрати на дипольну поляризацію, 2 – втрати на електропровідність, 3 – загальні втрати

За низьких частот величина $tg\delta$ визначається, в основному, струмом наскрізної провідності (рис. I.13, крива 2). Зі збільшенням частоти реактивний ємнісний опір зменшується пропорційно до частоти. Тому зростає реактивний струм, а, отже, $tg\delta$ зменшується.

За деякої частоти процеси релаксації починають відставати від зміни зовнішнього поля. В результаті з'являється активний поляризаційний струм, що росте пропорційно квадрату частоти. Це призводить до збільшення втрат та зростання $tg\delta$. Коли час поляризації τ стає порівнянним з періодом прикладеної напруги (ω_k), поляризаційні втрати максимальні, та $tg\delta$ досягає максимуму (рис. I.13, крива 1).

При подальшому збільшенні частоти один з релаксаційних видів поляризації, якщо їх багато, перестає встигати за зміною зовнішнього поля. Отже, цей вид поляризації зникає, $tg\delta$ також зменшується.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ ВІД ЧАСТОТИ

1.1. Мета та завдання роботи

Метою роботи є вивчення явищ поляризації та діелектричних втрат, ознайомлення з резонансним методом вимірювання основних параметрів ϵ і $\text{tg}\delta$ твердих діелектриків та дослідження їх частотних залежностей.

Завданням роботи є експериментальне визначення діелектричної проникності (ϵ) та тангенсу кута діелектричних втрат пасивних твердих діелектриків від частоти та аналіз цих залежностей.

1. Підготовка до виконання лабораторної роботи

У процесі підготовки до виконання лабораторної роботи необхідно:

1) усвідомити мету та завдання роботи, визначити, що є зразком (зразками) у даній роботі та які геометричні розміри зразка;

2) вивчити теоретичні положення до роботи з аналізом основних розрахункових формул, а також основних визначень та термінів: «діелектрик», «поляризація», «діелектрична сприйнятливність», «діелектрична проникність»;

3) визначити, що включає до себе лабораторна установка, усвідомити принцип роботи вимірювального приладу і як встановлюються діапазони частоти, визначити кількість діапазонів і межі зміни частоти, а також межі вимірювання ємності і добротності вимірювального контуру приладу;

4) по опису вивчити методику виконання, тобто. послідовність дій у процесі вимірів та накреслити таблицю вимірів з обов'язковим зазначенням одиниць вимірів;

5) побудувати графіки залежності визначених діелектричних параметрів від частоти;

6) проаналізувати отримані результати з поясненням фізичних процесів у діелектрику;

7) оформити звіт з лабораторної роботи.

1.2. Експериментальні виміри. Опис приладу

Вимірювання частотної залежності ϵ і $\text{tg}\delta$ здійснюється за допомогою приладу куметру (рис. 1.1, рис. 1.2).

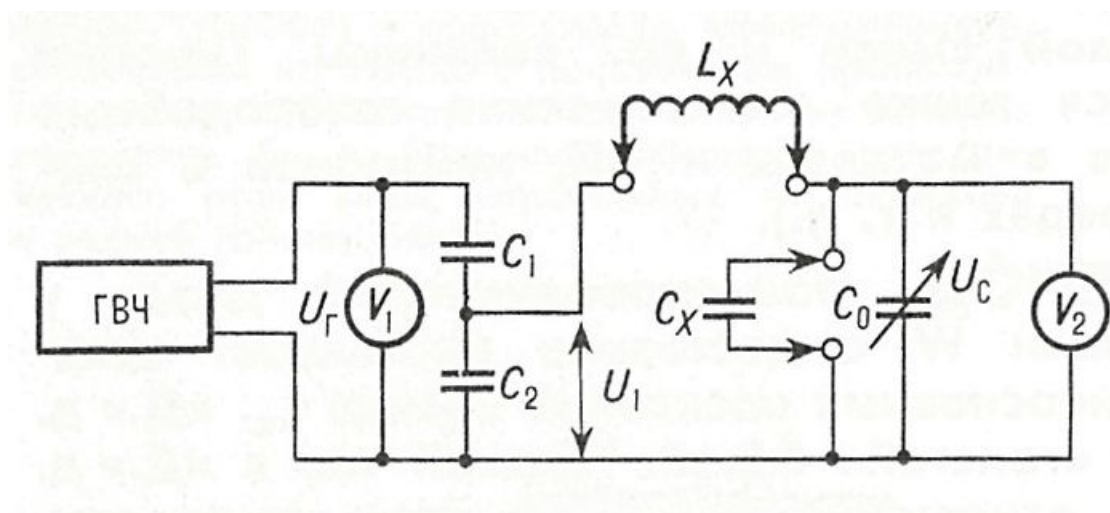
Куметром називається прилад, що дозволяє вимірювати добротність Q коливального контуру, індуктивність котушок, ємність та добротність

зразків діелектриків з нанесеними електродами, конденсаторів, кабелів.



Діапазон частот – від 50 кГц до 35 МГц (10 під-діапазонів). Основна похибка – 1%. Межі вимірюваної добротності - від 5 од. до 1000 од.

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд куметру ВМ 560 з комплектом котушок індуктивності (праворуч)



ГВЧ – генератор коливань високої частоти, V_1 – вольтметр для контролю вихідної напруги U_G , C_1 , C_2 – конденсатори ємнісного подільника, U_1 – вхідна напруга на вимірювальному контурі, V_2 – вольтметр – індикатор резонансу, U_c – напруга на зразковому конденсаторі C_0 , L_x – індуктивність котушок індуктивності, C_x – ємність зразків, що досліджуються

Рисунок 1.2 – Функціональна схема куметру

Принцип роботи куметру ґрунтується на використанні резонансного методу визначення добротності та ємності вимірювального контуру приладу, який налаштовується в резонанс із коливаннями внутрішнього генератора ГВЧ.

Змінюючи параметри контуру L_x і C_0 , можна змінювати його резонансну частоту f_0 .

Коли частота коливань внутрішнього генератора збігається із частотою f_0 , вимірювальний контур налаштовується в резонанс, при цьому його добротність стає максимальною, оскільки на резонансній частоті у

контурі спостерігаються мінімальні втрати. Значення добротності визначається за шкалою Q – вольтметра (рис. 1.1), розташованого на передній панелі приладу.

Частота коливань внутрішнього генератора змінюється ступінчасте у діапазонах і плавно всередині обраного діапазону. Кількість діапазонів і частот наведені на лицьовій панелі приладу. На ній також розташовані перемикач діапазонів та ручка плавного регулювання частоти.

Для того, щоб налаштувати вимірювальний контур у резонанс у вибраному діапазоні частот, необхідно змінити його параметри L_x і C_0 .

Індуктивність вимірювального контуру L_x визначається зовнішньою котушкою індуктивності L_x , що відповідає певному діапазону частот і підключається до зовнішніх клем приладу, розташований на кришці приладу. Котушки індуктивності знаходяться на лабораторному столі.

Ємність вимірювального контуру C_0 плавно регулюється від 25 pF до 450 pF за допомогою ручки на лицьовій панелі приладу та контролюється за шкалою ємності.

Таким чином, у кожному діапазоні частот внутрішнього генератора за рахунок конденсатора C_0 та зовнішньої котушки індуктивності L_x можна налаштувати вимірювальний контур у резонанс та визначити Q і C контуру.

Досліджуваними зразками є зразки з різними діелектриками з нанесеними фольговими електродами (також конденсатори, зразки кабелів з різними діелектриками, тощо). Вони підключаються до зовнішніх клем приладу паралельно вимірювальному конденсатору C_x , змінюючи параметри вимірювального контуру, тобто, його ємність C_0 .

Принцип вимірювань полягає у тому, що у вибраному діапазоні частот вимірювальний контур з C_0 налаштовується у резонанс на початку із зразком, а потім без зразка. При підключенні зразка до приладу змінюються параметри контуру та умова резонансу, оскільки зразок вносить додаткові втрати у контур та змінює його ємність. У результаті зміни ємності вимірювального конденсатора можна досягти резонансу. При цьому добротність і ємність контуру із зразком відрізняються від тих значень, які будуть у контуру без зразка. По різниці виміряних значень ємності контуру із зразком і без нього визначається ємність зразка C_x , а за значеннями добротності визначається $tg\delta$.

Добротність діелектричної ізоляції є величиною, зворотною $tg\delta$, тобто

$$Q = \frac{1}{tg\delta} \quad (1.1)$$

Високочастотний генератор ГВЧ забезпечений градуйованою шкалою для установки частоти. Вихідна напруга генератора регулюється і вимірюється електронним вольтметром V_1 . Через ємності дільнику C_1 , C_2 частина напруги генератора вводиться у вимірювальну схему, яка

представляє послідовний коливальний контур.

Вимірювальна схема складається із зразкового конденсатора змінної ємності C_0 і котушки L_x . Індикатором резонансу служить електронний вольтметр V_2 , що вимірює напругу на конденсаторі. У момент резонансу $U_2 = QE$, і якщо підтримувати значення E строго визначеним і умовно прийняти за одиницю, то вольтметр V_2 можна градуувати безпосередньо в одиницях добротності. Конденсатор дільнику C_2 має ємність, багато більшу, ніж C_1 , і не впливає на резонансні властивості контуру.

У приладі використовується явище резонансу у високо-добротному послідовному коливальному контурі. Цей контур сформовано зразковою високо-добротною котушкою індуктивності L_x і зразковим (зазвичай повітряним) змінним конденсатором C_0 . На контур подається напруга з високочастотного генератора ГВЧ, частоту f котрого можна змінювати у широкому діапазоні. На певній частоті f_0 сигналу генератора при змінюванні ємності конденсатора C_0 у контурі відбувається резонанс, який фіксується за максимальним значенням напруги на вольтметрі V_2 . В момент резонансу добротність контуру Q визначається як відношення значень напруги вольтметрів U_2 і U_1 , тобто $Q = U_2/U_1$. Якщо підтримувати напругу генератора на відомому рівні (наприклад, 1 В), то шкалу вольтметра U_2 можна визначити в значеннях добротності. Якщо в контур без калібрувальної індуктивності вноситься додаткова ємність C_x , наприклад, у вигляді ємності досліджуваного конденсатора (зразок діелектрика з нанесеними електродами), то змінюються резонансна частота контуру та його добротність. Резонансна частота змінюється у результаті збільшення сумарної ємності контуру $C = C_0 + C_x$, а добротність контуру знижується за рахунок втрат різного типу у підключеному конденсаторі. Налаштування контуру знову в резонанс на цій же частоті f_0 надає можливості по різниці значень показань конденсатора C_0 визначити величину ємності C_x . Це і є ємність досліджуваного зразка діелектрика (конденсатора).

Зменшення добротності контуру дозволяє оцінити величину втрат, що вносяться зразком з діелектриком (конденсатором) в коливальний контур, а відповідно, і його $tg\delta$.

Таким чином, за результатами двох вимірювань ємності та добротності контурів, а саме, за вимірюваннями:

- а) C_0, Q_1 – без зразка з калібрувальною індуктивністю,
- б) C, Q_2 – зі зразком діелектрика без калібрувальної індуктивності визначити ємність C_x (і, відповідно, дійсну складову комплексної діелектричної проникності) і тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta_x$ зразків діелектрика

$$C_x = C_0 - C, \quad tg\delta_x = (Q_2^{-1} - Q_1^{-1}) C_0 / C_x \dots \quad (1.2)$$

1.3. Методика виконання лабораторної роботи

1. Переконайтеся у наявності котушок індуктивності та зразків.
2. По лицьовій панелі пристрою візуально визначити: кількість діапазонів частот внутрішнього генератора; де знаходяться перемикач діапазонів, ручки плавного регулювання частоти та ємності вимірювального конденсатора; прилади для вимірювання добротності та ємності контуру; де підключаються зразки та зовнішні котушки індуктивності частотних діапазонів L_d .
3. Увімкнути перемикач живлення, при цьому повинна загорітися індикаторна лампочка.
4. Після 15-хвилинного прогрівання приладу ступінчастим перемикачем вибрати необхідний діапазон частот вимірювань (I діапазон – від 50 до 140 кГц) та регулятором плавної зміни частоти встановити її значення в середині діапазону.
5. Підключити до клем L_x еталонну котушку індуктивності для обраного діапазону частот, а до клем C_x – досліджуваний зразок.
6. Встановити перемикач «рід робіт» у положення «вимірювання».
7. Встановити значення ємності вимірювального конденсатора на початку шкали (70 – 100) pF та, повертаючи ручку плавної зміни частоти, добитися відхилення стрілки Q-вольтметра на можливо більшу величину, що свідчить про досягнення резонансу в контурі. Таким чином, резонанс контуру можна знайти, змінюючи частоту генератора у вибраному діапазоні частот.
8. Встановити зручну для побудови графіків частоту виміру. При цьому резонанс порушиться. Повертаючи ручку вимірювального конденсатора, налаштувати контур із зразком резонанс, тобто. на максимальне значення Q , коли при незначному повороті ручки вимірювального конденсатора в обидва боки значення Q буде зменшуватись.
9. Здійснити відлік значень C і Q_2 в умовах резонансу та записати їх у таблицю вимірів.
10. Не змінюючи обраного діапазону та значення частоти генератора, відключити досліджуваний зразок та, збільшуючи ємність вимірювального конденсатора, повторно налаштувати контур у резонанс і записати отримані значення $C_{обр}$, Q_1 у таблицю вимірів.
11. Вимірювання зробити для всіх п'яти діапазонів частот та заданих у роботі зразків.
12. За результатами вимірювань розрахувати:
 - а) ємність зразка

$$C_x = C_o - C; \quad (1.3)$$

Таблиця 1.1 – Результати вимірів та визначених діелектричних параметрів зразків діелектриків

№п/п	f , Гц	C , пФ	Q_1	C_o , пФ	Q_2	C_x , пФ	ϵ	$\text{tg}\delta$
1								
.								
2								
.								

б) діелектричну проникність ϵ за ємністю плоского конденсатора

$$C_x = \epsilon \epsilon_0 S / h, \quad (1.4)$$

$$\epsilon = C_x h / (\epsilon_0 S), \quad (1.5)$$

де S – площа електродів [м²],

h – товщина діелектрика чи відстань між електродами (м);

в) тангенс кута діелектричних втрат

$$\text{tg}\delta_x = (Q_2^{-1} - Q_1^{-1}) C_o / C_x \quad (1.6)$$

За результатами проведених обчислень порівняти значення розрахованої діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат із значеннями, наведеними у довіднику для матеріалу діелектрика зразка. Значення ϵ мають бути близькими у межах точності вимірювань.

13. Побудувати та проаналізувати залежність ϵ і $\text{tg}\delta$ від частоти, визначивши наявність чи відсутність поляризаційних процесів, які відстають від зміни зовнішнього поля. Зробити висновки щодо роботи.

1.4.Контрольні питання

1. Які речовини називають діелектриками?
2. Що таке поляризація?
3. Перерахувати основні види поляризації.
4. Що називається діелектричною проникністю?
5. Як практично визначається ϵ ?
6. Пояснити отриману частотну залежність ϵ .
7. Що таке втрати електричної енергії у діелектриках?
8. Причини виникнення втрат у діелектриках, поміщених у постійне та змінне електричні поля.
9. Що таке кут та тангенс кута діелектричних втрат?
10. Пояснити отриману залежність $\text{tg}\delta$ від частоти.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.

ВИЗНАЧЕННЯ ВИДІВ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ РІДКИХ НЕПОЛЯРНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ У ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТИ

2.1. Мета та завдання роботи

Метою роботи є визначення видів поляризації та діелектричних втрат рідких неполярних діелектриків у широкому діапазоні частоти із застосуванням цифрового вимірювача ємності і імітансу та рефрактометра.

Цифрові вимірювачі застосовуються у діапазоні частоти 100 Гц – 100 кГц, рефрактометр – у оптичному.

2.2. Підготовка до роботи.

У процесі підготовки до виконання роботи необхідно:

1) засвоїти мету та завдання роботи, ознайомитись з експериментальними зразками, визначити, який діелектричний матеріал у них використовується, а також з'ясувати, чим відрізняються зразки між собою;

2) вивчити теоретичні положення до роботи та основні визначення термінів та понять, таких як «поляризованість», «молярна рефракція», «показник заломлення», «рефракція».

3) розібратися, який принцип покладено у визначення показника заломлення, які прилади застосовуються та їх функціональні можливості, а також зразки;

4) вивчити методику виконання, тобто послідовність дій у процесі вимірювань та підготувати таблиці вимірювань з обов'язковим зазначенням одиниць вимірів.

2.3. Теоретичні положення до роботи з урахуванням мікроскопічної теорії поляризації діелектриків

2.3.1. Рефракція молекул

Важливою характеристикою для ідентифікації речовини є молярна рефракція.

Якщо яку-небудь речовину помістити у зовнішнє електричне поле, тоді атоми, молекули чи іони цієї речовини під дією поля піддаються тим чи іншим змінам, які об'єднуються під загальною назвою – поляризація (P).

$$\dot{P} = \dot{P}_{el} + \dot{P}_{at} + \dot{P}_{op} \quad (2.1)$$

де \dot{P}_{el} – вектор поляризації, обумовлений поляризацією зв'язаних електронів – зміщенням електронів відносно ядра;

\dot{P}_{am} – вектор поляризації, обумовлений поляризацією атомів – зміщення самих атомів, що утворюють молекулу;

\dot{P}_{op} – вектор поляризації, обумовлений орієнтаційною тепловою релаксаційною поляризацією – орієнтацією полярних молекул у просторі у відповідності з напрямком поля.

Здатність молекул до поляризації на мікроскопічному рівні характеризується поляризованістю (α), яка дорівнює сумі електронної, атомної і орієнтаційної поляризованості:

$$\alpha = \alpha_{el} + \alpha_{am} + \alpha_{op} \quad (2.2)$$

Електронна і атомна поляризованості не залежать від температури. Орієнтаційна (теплова дипольно-релаксаційна) поляризованість обернено пропорційна абсолютній температурі, оскільки хаотичний тепловий рух молекул порушує орієнтацію.

Р.Клаузіус і О.Моссотті довели, що поляризація речовини із неполярними молекулами безпосередньо пов'язана з її діелектричною проникністю (рівнянням Дебая):

$$P = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon - 2} \cdot \frac{M}{\rho} = N_A \cdot \alpha / (3 \epsilon_0), \quad (2.3)$$

де ϵ – діелектрична проникність речовини; M – молекулярна маса речовини; ρ – питома маса речовини; N_A – число Авогадро (моль $6,022 \cdot 10^{23}$ 1/моль), α – поляризованість молекули речовини.

Поляризованість – здатність її електронних оболонок деформуватися під впливом електричного поля, внаслідок чого молекула набуває індукований дипольний момент.

Поляризованість чисельно дорівнює наведеному дипольному моменту молекули при напруженості електричного поля E 1 В/м.

Всі види поляризації мають місце лише у статичному електричному полі, тобто полі, значення якого не змінюється у часі. У змінному електричному полі, що має назву електромагнітного поля, картина буде іншою. Наприклад, під впливом електромагнітних коливань, що за частотою відповідають видимому спектру світла, тобто мають частоту $\sim 10^{15}$ Гц, атомна і орієнтаційна поляризація не виникають, тому що атоми і молекули внаслідок своєї маси не встигають рухатись зі швидкістю, з якою відбувається зміна значення і напрямку електричної складової електромагнітного поля.

2.3.2. Молярна рефракція молекул

Молярна поляризація при взаємодії прозорого діелектрика із видимим світлом, що дорівнює електронній поляризації, називається молярною рефракцією:

$$R_M = P_e \quad , \quad (2.4)$$

Взаємодія світла з електричним полем електрону у молекулі речовини призводить до зменшення швидкості світла у речовині у порівнянні з його швидкістю у вакуумі:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu} \quad , \quad (2.5)$$

де n – показник заломлення середовища (абсолютний); $c=3 \cdot 10^8$ м/с і v – фазові швидкості світла відповідно у вакуумі і речовині.

Згідно із теорією електромагнітного поля Д. Максвелла для неполярних речовин показник заломлення світла залежить від діелектричної проникності речовини:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad , \quad (2.6)$$

де μ – магнітна проникність прозорого діелектрика.

У більшості реальних прозорих речовин магнітна проникність дуже близька до одиниці, тому останню формулу іноді спрощують до виду:

$$n = \sqrt{\epsilon} .$$

Діелектрична проникність у цій формулі може значно відрізнятись від табличних значень, оскільки в таблицях зазвичай наведено значення проникності у постійному електричному полі. У полі, що швидко змінюється (саме таке поле створює електромагнітна хвиля), молекули не встигають поляризуватись, що призводить до зменшення діелектричної проникності. Особливо це стосується полярних молекул таких як вода: діелектрична проникність води в постійному електричному полі $\epsilon = 81$, проте для полів, що змінюються з частотою ($10^{14} - 10^{15}$) Гц (оптичний діапазон), вона падає до 1,78.

2.3.3. Рефрактометричний метод аналізу діелектриків

Показник заломлення – найважливіша оптична характеристика речовини. Абсолютний показник заломлення n залежить від довжини світлових хвиль, λ що поширюються у речовині, що обумовлено залежністю діелектричної проникності, а значить і фазової швидкості, від довжини хвилі (дисперсія діелектричної проникності). Щоб характеризувати цю залежність, вводиться поняття дисперсії речовини

$$d = dn/d\lambda_0 ,$$

де λ_0 – довжина світлової хвилі у вакуумі. Дисперсія називається нормальною, якщо зі збільшенням довжини хвилі показник заломлення зменшується і аномальною, якщо збільшується. У матеріалах оптичних волокон на основі оксидів кварцу спостерігається саме нормальна дисперсія показника заломлення. Прояв залежності показника заломлення від довжини хвилі (частоти) обумовлює важливу складову часової дисперсії при розповсюдженні оптичних сигналів – матеріальної. Ця дисперсія визначає оптимальний діапазон робочих довжин хвиль одномодових оптичних волокон для підвищення швидкості передачі цифрових сигналів у одномодових оптичних волокнах волоконно-оптичних кабелів.

Мірою дисперсії речовини служить величина, яка називається середньою дисперсією

$$d > = n_F - n_C ,$$

де n_F – показник заломлення речовини для блакитної лінії у спектрі водню ($\lambda_F = 486,1$ нм), а n_C – для червоної лінії ($\lambda_C = 656,3$ нм).

Контроль показників заломлення твердих, рідких та газоподібних середовищ здійснюється методами *рефрактометрії*. До них відносяться інтерференційні методи та методи, засновані на безпосередньому вимірі кутів заломлення світла при проходженні межі розділу двох середовищ (кутові методи).

Інтерференційні методи використовуються головним чином для контролю дуже малих змін n , що має місце, наприклад, у газах, рідинах та розчинах при зміні температури, тиску та інших параметрів стану. Абсолютна похибка вимірювання показника заломлення такими методами становить 10^{-6} .

Куткові методи дають точність на два порядки менше (близько 10^{-4}), проте вони простіші й швидше у роботі. Прилади, призначені для контролю показників заломлення, називаються рефрактометрами. Найбільш широко поширені рефрактометри, що працюють за схемами Аббе та Пульфріха, рефрактометри занурення, безперервних процесів та ін.

У виробничих та лабораторних системах контролю найчастіше застосовують рефрактометричні методи, засновані на вимірі кута повного внутрішнього зображення. З їх допомогою можна ідентифікувати досліджувані речовини, визначати ступінь їхньої чистоти, контролювати структури хімічних сполук та вивчати природу міжатомних зв'язків у молекулах, аналізувати складні системи рідких та газоподібних речовин.

Рефрактометричний метод аналізу базується на вимірюванні показника заломлення. Промінь світла (електромагнітної хвилі), який проходить із одного прозорого середовища в інше під нахилом до поверхні розділу середовищ, змінює свій початковий напрямок, тобто заломлюється.

Заломлення світла (рефракція) обумовлена різною фазовою швидкістю у поширення світла у різних середовищах. Відношення синуса кута падіння (α) до синуса кута заломлення (β) дорівнює відношенню швидкості

поширення світла в середовищах і є постійною величиною для певних двох середовищ:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{x_1}{x_2} = n \quad (2.7),$$

де n – показник заломлення середовища 1 (по відношенню до середовища 2).

Показник заломлення при даній температурі і довжині хвилі (частоті) є важливою фізико-хімічною константою, яка характеризує ідентичність і чистоту речовини. Показник заломлення дозволяє робити розрахунок густини і концентрації. При кількісному рефрактометричному аналізі концентрацію визначають за графіком залежності показника заломлення від концентрації розчину. У деяких випадках за виглядом кривих показників заломлення можна робити висновки про характер взаємодії речовин і утворення сполук. Визначення показника заломлення здійснюють за допомогою рефрактометрів.

2. 4. Метод вимірювання показника заломлення

Метод визначення показника заломлення базується на вимірюванні граничного кута заломлення при переході світла із середовища з меншою оптичною густиною (1, наприклад, досліджувана трансформаторна олива) до середовища з більшою оптичною густиною (2, наприклад, скло — матеріал призми).

При переході світла крізь межу поділу двох середовищ (рис.2.1) виконуються наступні умови:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.8)$$

де α і β – відповідно кути падіння і заломлення світла; v_1 і v_2 – швидкості розповсюдження світла у речовинах 1 і 2; n_1 і n_2 – показники заломлення світла у речовинах 1 і 2. Оскільки за умовою $v_1 > v_2$, маємо $\alpha > \beta$.

При зростанні кута падіння до граничного значення $\alpha_{\text{гр}} = 90^\circ$ кут заломлення сягає свого граничного значення $\beta_{\text{гр}}$. При цьому усі промені, що потрапляють із середовища 1 до середовища 2, залишаються у межах граничного кута заломлення $\beta_{\text{гр}}$. Це явище призводить до появи різкої границі між світлою і темною областями, що спостерігають за допомогою зорової труби.

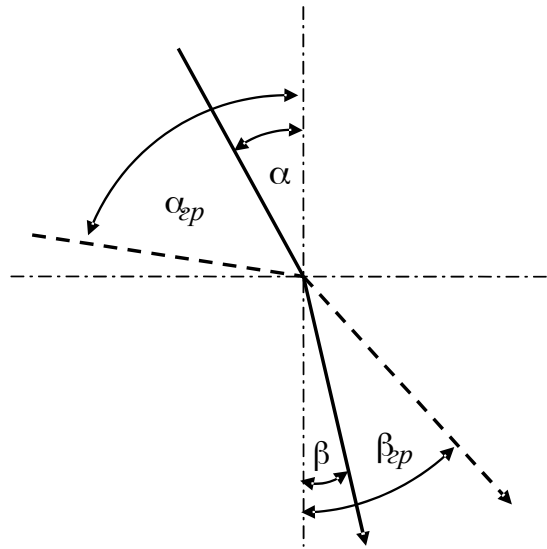


Рисунок 2.1 – Проходження променів світла границі поділу двох середовищ різної густини

2.5. Опис приладів для експериментальних вимірів діелектричних параметрів рідких неполярних діелектриків.

2.5.1. Рефрактометр лабораторний УРЛ-1 (рис. 2.2) призначений для безпосереднього вимірювання показників заломлення рідких і твердих речовин методом повного відображення.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд рефрактометру УРЛ-1

Хід променів у рефрактометрі УРЛ-1 (схема Аббе) показаний на рис.

2.3.

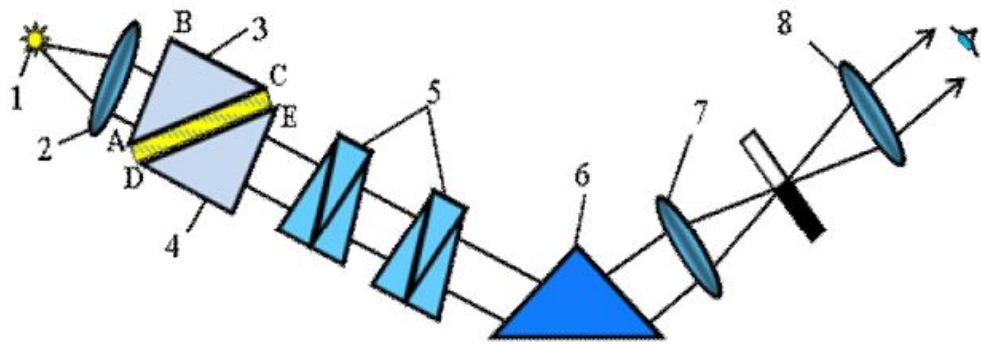


Рисунок 2. 3 – Хід променів у рефрактометрі УРЛ-1

Світловий пучок від джерела світла 1 за допомогою лінз конденсорних 2 направляється на вхідну грань AB освітлювальної призми 3, проходить через матову грань AC призми в тонкий (товщиною не більше 0,1 мм) шар досліджуваної рідини та падає під всілякими кутами на межу рідина – грань DE вимірювальної призми 4, де заломлюється.

У вимірювальній призмі 4 заломлені промені можуть становити з нормаллю до грані DE кути, розташовані в інтервалі від 0 до до $\pm i_{\text{пр}}$ (граничного кута повного внутрішнього відбиття) (рис. 2.4). Далі ці промені 2 проходять через призми прямого зору 5, відбивну призму 6 і у фокальній площині збиральної лінзи 7 (об'єктива зорової труби) утворюють світлу і темну частини поля, розділені прямою границею.

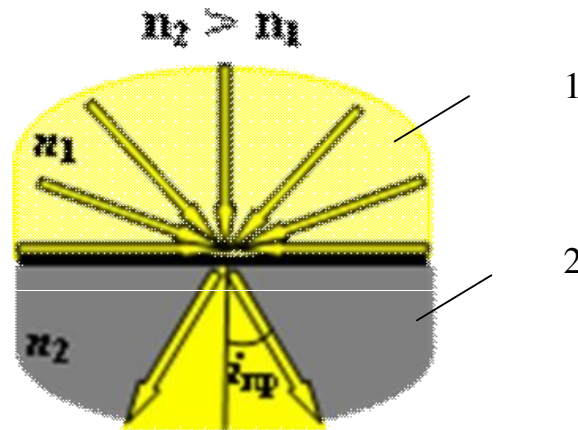


Рисунок 2.4 – Хід променів у освітлювальній (1) та вимірювальній (2) призмах

Границя світлотіні розглядається в окуляр 8 зорової труби. У фокальній площині об'єктива та окуляра зорової труби спостерігається межа світлотіні, перехрестя сітки та шкала, проградуєйована у значеннях показників заломлення. n_d , визначених для середнього значення довжин хвиль ($\lambda = 589,3$ нм) двох близьких жовтих ліній у діапазоні парів натрію.

Положення межі світлотіні залежить від показника заломлення досліджуваної рідини.

Внаслідок явища дисперсії при спостереженні у білому світлі межа світлотіні має райдужне забарвлення. Для усунення забарвленості служить конденсор, що складається із двох призм прямого зору 5. Шляхом обертання щодо осі зорової труби призми встановлюють у таке положення, при якому межа світлотіні не має райдужного забарвлення.

Загальний вигляд рефрактометра УРЛ-1 подано на рис. 2.5. На підставі 1 розташований корпус 2 приладу. Вимірювальна призма знаходиться всередині нижньої 3 камери, яка жорстко закріплена на корпусі. Освітлювальна призма знаходиться всередині верхньої камери 4, з'єднаної з нижньою камерою і повертається щодо неї. Освітлювач 5 рухомо укріплений на штуцері нижньої камери. Камери обладнані пристроями для термостатування (термометр 6, штуцери, з'єднувальні канали всередині камер та ін), які використовуються при точних вимірах.

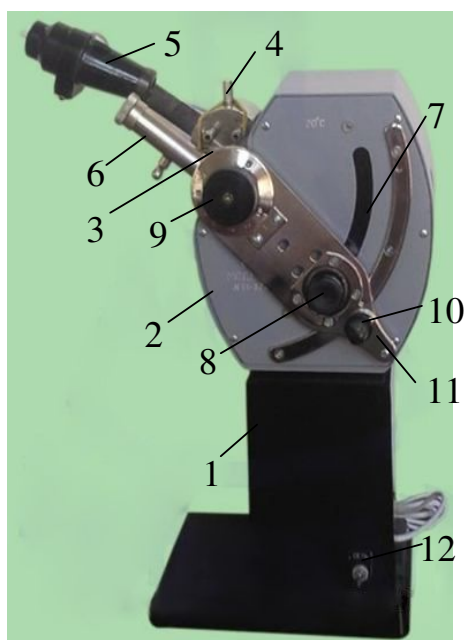


Рисунок 2.5 – Загальний вигляд рефрактометра УРЛ-1 з позначеннями елементів

З боку передньої кришки корпусу видно шкалу 7 рефрактометрів. Для усунення забарвленості меж світлотіні, що спостерігається в окуляр 8, служить лімб дисперсійного 9 компенсатора. На осі приладу укріплена ручка 10 з окуляром 8 і механізмом налаштування 11, що дозволяє поєднати межу світлотіні з перехрестям сітки.

Усередині основи приладу розташований трансформатор, що понижує. Перемикач 12, що знаходиться на передній стінці основи, призначений для включення освітлювача.

Рідина, що досліджується, розміщується у вимірювальній комірці з електродами (рис.2.6).



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд вимірювальної комірки з досліджуваним рідким діелектриком та системою циліндричних електродів діаметрами d_1 , d_2 для вимірювання електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат у діапазоні частоти 100 Гц – 100 кГц

2.5.2. Для вимірювання ємності у діапазоні частоти 100 Гц — 100 кГц застосовується цифровий вимірювач ємності і імітанса серії DER EE LCR Meter De – 5000 (рис. 2.7). Портативний цифровий вимірювач DER EE E-500 призначений для вимірювання опору, модуля комплексного опору, ємності, індуктивності, тангенса кута втрат, добротності.



Рисунок 2.7 – Цифровий вимірювач DER EE E-500

Цифровий вимірювач RLC Meter DE-5000, загальний вигляд якого показаний на рис. 2.8, а також список його елементів у таблиці 2.1, являє

собою високоточний вимірювач параметрів LCR з подвійним дисплеєм (максимальне на дисплеї число 19999/9999). Цей прилад дозволяє вимірювати індуктивність, ємність, опір і вторинні параметри, включаючи тангенс кута втрат (D - dissipation), добротність (Q), кут зсуву фаз (θ), еквівалентний послідовний, паралельний опір (ESR або R_p).

Вимірювач DE-5000 працює в режимі автоматичного вибору діапазону повного опору змінного струму і опору постійного струму. Параметри L/C/R можна вимірювати безпосередньо за допомогою інтелектуального режиму «AUTO-LCR», не використовуючи функціональну кнопку. Параметри можна вимірювати автоматично в режимі послідовної або паралельної схеми заміщення відповідно до повного опору пристрою, що перевіряється.

Прилад дозволяє вибирати такі значення частоти вимірювання: 100 Гц; 120 Гц; 1 кГц; 10 кГц; 100 кГц.

Режим сортування (SORTING) дозволяє швидко розподіляти компоненти по каналах вибірки.

Рідкокристалічний дисплей з підсвічуванням дозволяє зчитувати показання навіть в темряві.

Зазвичай прилад живиться від батареї 9 В, але в якості опціонального входу живлення можна також використовувати адаптер постійного струму 9 В.

Виміряні дані можна передавати в комп'ютер через опціональний повністю оптично-ізолюваний інтерфейс USB-IR.

Загальні характеристики цифрового вимірювача RLC Meter DE-5000 представлені в табл. 2.2.

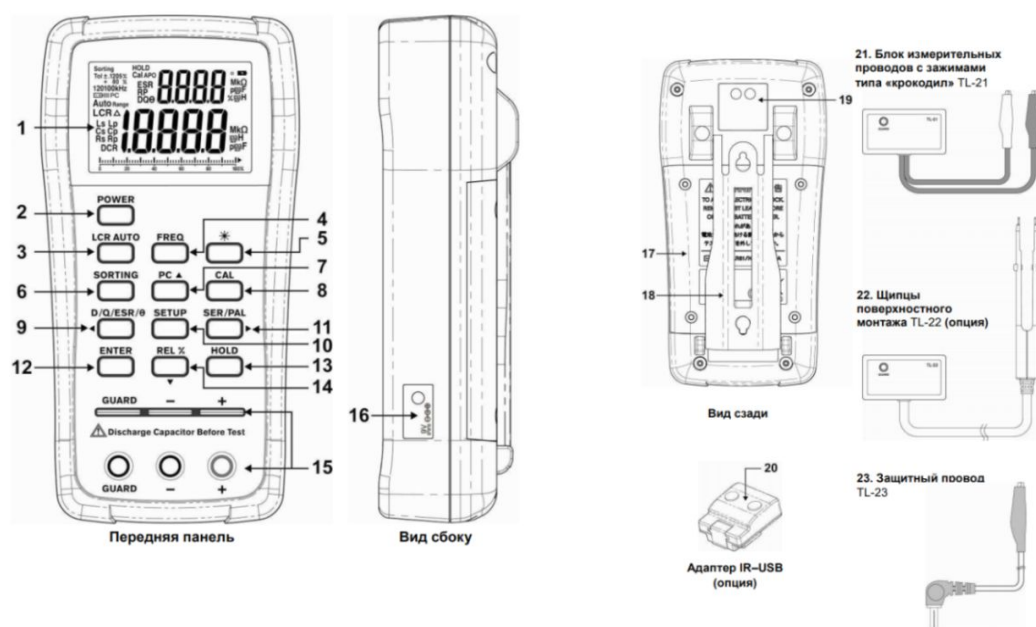


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд цифрового вимірювача RLC Meter DE-5000

Таблиця 2.1 – Елементи цифрового вимірювача RLC Meter DE-5000

1	Рідкокристалічний дисплей	
2	POWER	Кнопка включення/виключення живлення приладу
3	LCR AUTO	Режим автоматичного вимірювання параметрів LCR, кнопка вибору вимірювання індуктивності, ємності, опору і опору постійного струму
4	FREQ	Кнопка вибору частоти вимірювання
5		Підсвічування дисплея
6	SORTIN G	Кнопка управління режимом сортування
7	PC	Кнопка управління передачею даних
8	CAL	Кнопка запуску калібрування в режимі холостого ходу/короткого замикання
9	D/Q/ ESR/θ	Кнопка вибору вторинних параметрів D/Q/ESR/θ
10	SETUP	Кнопка виклику меню налаштування (в режим сортування)
11	SER/ PAL	Кнопка вибору послідовної і паралельної схеми
12	ENTER	Кнопка управління меню налаштування (в режимі сортування)
13	REL%	Кнопка режиму відносного вимірювання
14	HOLD	Кнопка режиму утримання даних
15	Вхідні роз'єми	
16	Адаптер живлення AC / DC	

Продовження таблиці 2.1

17	Кришка батарейного відсіку
18	Підставка
19	Слот для адаптера IR-USB
20	Адаптер IR-USB (опція)
21	Блок вимірювальних проводів з зажимами типу «крокодил» TL-21
22	Щипці поверхневого монтажу TL-22 (опція)
23	Захисний провід TL-23

Роз'єм «GUARD» забезпечує екран для пристрою, що перевіряється, імпрізованих вимірювальних щупів або обладнання, розташованого в місцях наявності сильних перешкод.

Рідкокристалічний дисплей цифрового вимірювача RLC Meter DE-5000 представлено на рис. 2.9, а також його елементи в табл. 2.2 і спеціальні індикації в табл. 2.3.





Рисунок 2.9 – Рідкокристалічний дисплей цифрового вимірювача RLC Meter DE-5000

Таблиця 2.2 – Елементи рідкокристалічного дисплею цифрового вимірювача

1	Sorting	Функція сортування включена
2	Tol	Індикація допуску в режимі сортування: $\pm 0,25\%$, $\pm 0,5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, & $+80\%-20\%$
3	kHz	Індикація частоти вимірювання: 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц, 100 Гц, 120 Гц
4	PC	Індикатор режиму обміну даних
5		Індикатор заряду батареї
6	Range	В меню налаштування режиму сортування включений вибір діапазону
7	Auto	Включена функція автоматичного вибору діапазону для вимірювання параметрів L, C або R
8	LCR	Автоматична перевірка параметрів L / C / R
9		Включена функція відносного вимірювання
10	LS/LP	Включена функція вимірювання індуктивності в послідовній або паралельній схемі
11	CS/CP	Включена функція вимірювання ємності в послідовній або паралельній схемі
12	RS/RP	Включена функція вимірювання опору змінного струму в послідовній або паралельній схемі
13	DCR	Обрано режим вимірювання опору постійного струму
14	D/Q/θ	Включена функція вимірювання тангенса кута втрат, добротності або фазового кута для режиму вимірювання L / C
15	Rp	Включена функція вимірювання опору змінного струму в паралельній схемі
16	Cal	Режим калібрування в режимі холостого ходу / короткого замикання
17	HOLD	Функція утримання даних
18	AP0	Режим автоматичного відключення живлення
19	ESR	Режим еквівалентного послідовного опору
20		Додатковий дисплей
21	°	Одиниця виміру фазового кута
22	MkΩ	Одиниці виміру опору (Ω / Ом, kΩ / кОм і MΩ / МОм) на додатковому дисплеї
23		Одиниці виміру ємності (pF / пФ, nF / нФ, μF / мкФ і mF / мФ) – на додатковому дисплеї
24		Одиниці виміру індуктивності (μH / мкГн, mH / мГн і H / Гн) – на додатковому дисплеї
25	%	Відсоткове значення в режимі відносного вимірювання – на додатковому дисплеї
26		Основний дисплей
27	MkΩ	Одиниці виміру опору (Ω / Ом, kΩ / кОм і MΩ / МОм) – на основному дисплеї
28		Одиниці виміру індуктивності (μH / мкГн, mH / мГн і H / Гн) – на основному дисплеї
29		Одиниці виміру ємності (pF / пФ, nF / нФ, μF / мкФ і mF / мФ) – на основному дисплеї
30		Гістограма

Таблиця 2.3 – Спеціальні індикації

	Індикатор калібрування в режимі короткого замикання
	Індикатор калібрування в режимі холостого ходу

Таблиця 2.4 – Загальні характеристики цифрового вимірювача RLC Meter DE-5000

Прилад	Вимірювач параметрів LCR з подвійним дисплеєм
Параметри вимірювання	Ls/ Lp/ Cs/ Cp/ Rs/ Rp/ D/ Q/ θ / ESR Автоматичний вибір вимірювання L C R
Схема вимірювання	Послідовна / паралельна
Дисплей	Подвійний дисплей 19999/1999
Вибір діапазону	Автоматично
Роз'єми вимірювання	4-провідні роз'єми (клеми) і захисний роз'єм
Діапазон вимірювання в режимі Auto LCR:	L: 20,000 мкГн...2,000 кГн C: 200,00 пФ...20,00 мФ R: 20,000 Ом...200,0 МОм DCR: 200,00 Ом...200,0 МОм
Частота вимірювання	100 Гц / 120 Гц / 1 кГц / 10 кГц / 100 кГц
Підсвічування	ТАК
Режим допуску	$\pm 0,25\%$, $\pm 0,5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $-20\%+80\%$
Рівень сигналу	звичайно 0,5 Вскв
Частота вимірювання	номінально 1,2 /с
Час реакції	прибл. 1 с / перевіряється пристрій
Автоматичне відключення живлення	через прибл. 5 хвилин простою
Коефіцієнт температури	0,15 x (похибка)/ °C (0...18 °C, 28...50 °C)
Робочі умови	0 °C...50 °C; 0–70% R.H.
Умови зберігання	-20 °C...+60 °C; 0–80% R.H.
Індикатор розряду батареї	Батарея повністю заряджена,  . Батарея розряджена,  . Відразу замініть батарею.
Стандартні приладдя	Блок вимірювальних проводів з зажимами типу «крокодил» (TL-21), адаптер AC / DC, захисний провід (TL-23), керівництво по експлуатації, батарея 9 В DC
Опція	Адаптер IR-USB, щипці поверхневого монтажу (TL-22)
Розміри (Д / Ш / В)	188 / 95 / 52,5 мм
Маса	прибл. 350 г (тільки прилад, без батареї)

Для визначення видів поляризації у широкому діапазоні частоти, у тому числі оптичному, необхідно обирати неполярні рідкі діелектрики. Ця умова необхідна для виконання умови щодо співвідношення між діелектричною проникністю та показником заломлення у оптичному діапазоні частоти.

Для діелектриків з електронною поляризацією має місце наближена рівність діелектричної проникності квадрату показника заломлення світла $\epsilon \approx n^2$, яку можна використовувати для оцінки ступеня полярності речовини.

Неполярні діелектрики, для яких характерна тільки електронна поляризація (наприклад, поліетилен, політетрафторетилен (фторопласт-4), полістирол, парафін, сірка та ін.) мають при нормальних умовах типові значення $\epsilon = 1,9 \dots 2,7$.

Для діелектриків, у яких переважає електронна поляризація (із твердих діелектриків це ковалентні та молекулярні кристали), характерні мала залежність діелектричної проникності від температури і виключно малі діелектричні втрати, навіть на високих частотах, а також незначне поглинання не тільки в оптичній (видимій області спектру), але і в ІЧ (інфрачервоній) -області спектра.

Діелектрична проникність при електронній поляризації:

$$\epsilon = 1 + n \cdot \alpha_e / \epsilon_0 \quad (2.10)$$

де α_e – електронна поляризованість, n – кількість атомів у одиниці об'єму.

2.6. Методика виконання лабораторної роботи

Порядок виконання роботи

а) із застосуванням рефрактометра УРЛ-1

Вимірювання показника заломлення.

1. Ознайомитись із пристроєм рефрактометра. Включити його до мережі. Зняти пробку із вікна верхньої камери, вікно нижньої камери має бути закрито. Відкрити верхню камеру, промити кількома краплями дистильованої води поверхню вимірювальної та освітлювальної призми і насухо витерти їх м'якою тканиною.
2. Нанести одну-дві краплі рідини, що досліджується, на поверхню вимірювальної призми і закрити верхню камеру 4 (див. рис. 2.5). Зміщуючи освітлювач 5, спрямувати промінь світла у вікно верхньої камери. Переміщенням ручки 10 з окуляром зорової труби вгору або вниз ввести в поле зору межу світлотіні. Поворотом важеля освітлювача навколо осі досягти максимальної контрастності межі світлотіні.
3. Встановити обертанням оправы окуляра 8 різкість межі світлотіні, штрихів шкали та перехрестя сітки по оці спостерігача. Усунути забарвленість межі світлотіні обертанням лімба 9 дисперсійного компенсатора.
4. Переміщаючи ручку з окуляром, підвести межу світлотіні до центру перехрестя сітки та записати відлік n_d за шкалою показників заломлення. Вимірювання зробити кілька разів, знайти середнє значення n_d та оцінити похибку вимірювань.
5. Провести вимірювання показника заломлення (п. п. 1.1–1.4) для води (вимірювання № 1).

б) із застосуванням цифрового вимірювача ємності і імітансу

6. Підключити цифровий вимірювач RLC Meter DE-5000 з'єднувальними провідниками до вимірювальної комірки з досліджуваним рідким діелектриком та системою електродів.
7. За допомогою перемикача вибору схеми заміщення вибрати режим вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат за паралельної схеми заміщення.
8. Визначити діелектричну проникність ϵ досліджуваної рідини за результатами вимірювань електричної ємності за формулою циліндричного конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon * l}{\ln \frac{d1}{d2}}, \quad (2.11)$$

де $d1, d2$ – діаметри зовнішнього, внутрішнього електродів довжини l .

9. Побудувати та проаналізувати залежність діелектричної проникності ϵ у широкому діапазоні частоти, включаючи і оптичний, і $\text{tg}\delta$ в діапазоні 100 Гц – 100 кГц. Пояснити отриману залежність $\text{tg}\delta$ від частоти.
10. Провести аналіз отриманих результатів на підставі частотної залежності діелектричної проникності із визначенням видів поляризації, визначивши стан рідини (наявність вологи) . Зробити висновки щодо роботи.

2.7.Контрольні питання

1. Що характеризує поляризованість?
2. Як впливає температура на електронну, атомну та орієнтаційну поляризованість?
3. Як пов'язана поляризація речовини із неполярними молекулами з її діелектричною проникністю
4. Що являє собою молекулярна рефракція?
5. Як визначається абсолютний показник заломлення?
6. Як називаються прилади для контролю показників заломлення?
7. На якому фізичному законі базується метод визначення показника заломлення?
8. Чим обумовлено необхідність обирати для досліджень у оптичному діапазоні для визначення показника заломлення неполярні діелектрики?
9. Чим пояснюється суттєве зменшення діелектричної проникності сильно полярної рідини води у оптичному діапазоні?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ У ДІЕЛЕКТРИКАХ З ВІЗУАЛІЗАЦІЄЮ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ НАПРУЖЕНІСТЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ТА ВЕКТОРОМ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

3.1. Мета та завдання роботи

Мета роботи полягає у:

1. візуалізації залежності між напругою, що прикладається до конденсаторів з пасивним діелектриком, та електричним зарядом (напруженістю електричного поля та вектором поляризації);

2. вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат у діапазоні частоти прояву дипольно-релаксаційної поляризації діелектриків.

Завданням роботи є дослідження діелектричних втрат пасивних діелектриків від частоти з візуалізацією залежності між напруженістю електричного поля вектором поляризації.

3.2. Підготовка до роботи.

У процесі підготовки до виконання роботи необхідно:

1) засвоїти мету та завдання роботи, ознайомитись з експериментальними зразками низьковольтних конденсаторів з визначенням типу діелектрику, що в них застосовується відповідно до маркування конденсаторів;

2) вивчити теоретичні положення до роботи та основні визначення термінів та понять, таких як «комплексна діелектрична проникність», «діелектричні втрати», «активна провідність», «питомі втрати електричної енергії»;

3) розібратися із маркуванням низьковольтних конденсаторів для радіоелектронної апаратури в залежності від типу діелектрика, що в них застосовано;

3) розібратися, які прилади застосовуються для візуалізації залежності між напруженістю електричного поля і вектором поляризації та їх функціональні можливості;

4) вивчити методику виконання, тобто послідовність дій у процесі вимірювань та підготувати таблиці вимірювань з обов'язковим зазначенням одиниць вимірів.

3.3. Теоретичні положення до роботи

3.3.1. Зв'язок між напруженістю електричного поля та вектором поляризації

Стан діелектрика, що знаходиться у зовнішньому електричному полі, визначається двома векторними величинами: напруженістю електричного

поля E і поляризованістю (вектором поляризації) діелектрика P . Напруженість електричного поля E характеризує силову дію поля на заряджені частинки речовини. Поляризованість P (вектор поляризації) – це величина, яка кількісно характеризує явище поляризації. Вона залежить від здатності до зміщення центрів тяжкості зарядів речовини в електричному полі і є дипольний момент одиниці об'єму діелектрика, тобто, дорівнює векторній сумі дипольних моментів молекул. (атомів, іонів), що знаходяться в одиниці об'єму діелектрика:

$$\dot{P} = \lim (1/\Delta V \sum \mu_i) \quad (3.1)$$

де n – число диполів молекул, що містяться в об'ємі ΔV діелектрика; μ_i – індукований дипольний момент i -ї молекули (атома, іона).

Залежність $P(E)$ характеризує електричні властивості діелектрика. Для більшості діелектриків у не дуже сильних електричних полях справедлива лінійна залежність P від E :

$$\dot{P} = \epsilon_0 \chi \cdot \dot{E} \quad (3.2)$$

де ϵ_0 – електрична постійна, рівна $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Такі діелектрики називають лінійними.

Безрозмірний параметр χ , що характеризує здатність речовини поляризуватися, називається діелектричною сприйнятливістю діелектрика. Замість вектора поляризації P часто користуються вектором електричного зміщення D (вектор електричної індукції):

$$\dot{D} = \epsilon_0 \dot{E} + \dot{P} \quad (3.3)$$

Введення D не дає додаткової інформації про поведінку діелектрика в електричному полі, але значно спрощує вивчення електричного поля у діелектрику.

Вектор електричної індукції D представляє собою геометричну суму двох різних фізичних величин: напруги поля в даній точці діелектрика (помноженої на ϵ_0) і поляризації об'єму середовища у цій самій точці. У різних частинах неоднорідного діелектрика, де ϵ відрізняється за величиною, поле вектора E буде різним, тоді як поле вектора D скрізь буде однаково. Одиниця виміру D (Кл/м²) така ж, що і для P .

У разі, наприклад, вакууму $P=0$ і вектор індукції D збігається із напруженістю поля. Таким чином, електрична постійна ϵ_0 характеризує електричне поле за відсутності взаємодії його з речовиною.

У діелектриках з урахуванням (3.1) вектор електричного зміщення (електричної індукції) дорівнює

$$\dot{D} = \varepsilon_0 \dot{E} + \dot{P} = \varepsilon_0 \dot{E} + \varepsilon_0 \chi \dot{E} = (1 + \chi) \varepsilon_0 \dot{E} = \varepsilon \varepsilon_0 \dot{E} \quad (3.4)$$

де $\varepsilon = 1 + \chi$ — діелектрична проникність.

Діелектрична проникність обумовлена поляризацією діелектрика і показує, у скільки разів напруженість електричного поля в діелектрику менше напруженості зовнішнього електричного поля, у якого му знаходиться діелектрик.

Діелектрична проникність ε для всіх діелектриків більше одиниці (виключенням є оптичний діапазон, у якому спостерігається суттєве поглинання електромагнітної енергії та аномальне значення ε менше 1). Її визначають як величину, що показує, у скільки разів зменшується сила взаємодії двох точкових зарядів при перенесенні їх із вакууму в діелектрик. Для вакууму $\chi=0$ та $\varepsilon=1$. Безрозмірні величини χ і ε є основними характеристиками електричних властивостей діелектрика.

Розглянемо систему конденсатора, що складається із двох металевих електродів (обкладок), віддалених один від одного на відстань h . Поверхній заряд кожного з електродів позначимо через Q . Досвід показує, що заряд Q пропорційний різниці потенціалів між обкладками конденсатора C : $Q = C U$.

Коефіцієнт пропорційності між Q і U - ємність конденсатора C . Ємність конденсатора залежить від геометричних розмірів та конфігурації електродів. Якщо між обкладками конденсатора площі S знаходиться вакуум, то ємність визначається за формулою

$$C = \varepsilon_0 \cdot S / h \quad (3.5)$$

При внесенні між обкладками конденсатора діелектрика з діелектричною проникністю ε в результаті поляризації на протилежних поверхнях діелектрика утворюються заряди протилежного знаку. Ці заряди нейтралізують частину повного заряду на електродах, що знижує напруженість поля в діелектрику в порівнянні із вакуумом. При збереженні поверхневого заряду обкладок Q зменшується різниця потенціалів між ними, а при незмінній напруженості U зростає заряд на обкладках. Отже, ємність такого конденсатора збільшиться в ε разів:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S / h \quad (3.6)$$

Зміщення зв'язаних зарядів у напрямку зовнішнього поля потребує витрат енергії, тому воно відбувається не миттєво, а протягом деякого часу, який називають часом встановлення поляризації τ .

Час встановлення поляризації τ є ще однією важливою характеристикою процесів поляризації. З іншого боку, процес поляризації діелектрика зазвичай розглядається як зворотній процес. Зворотність

поляризації також вимагає деякого часу, щоб електрони, атоми та диполі речовини встигли здійснити необхідні переміщення. **Час зменшення упорядкованості орієнтованих полем диполів після зняття електричного поля у е (2,71) разів називається часом релаксації. Час встановлення поляризації τ приймається рівним часу релаксації.**

Діелектрична проникність ϵ , діелектрична сприйнятливість χ і час встановлення поляризації τ залежать від зовнішніх факторів: частоти поля, температури, тиску і т.п.

3.3.2. Питомі діелектричні втрати у діелектриках

У розділі 1 розглянуто типи та механізми пружної (деформаційної), релаксаційної (теплової) та міграційної (об'ємно-зарядної) поляризації.

Поляризаційні процеси встановлення зарядів у діелектрику до моменту встановлення їх рівноважного стану викликають перебіг поляризаційних струмів - струмів зміщення. Струми зміщення при пружних видах поляризації занадто короткочасні, щоб їх можна було якось зафіксувати. Напроти, струми зміщення при релаксаційних видах поляризації легко спостерігаються, і їх називають струмами абсорбції. Наявність у діелектриках незначної концентрації вільних носіїв заряду призводить до виникнення слабких струмів наскрізної провідності (струмів витоку). Таким чином, загальний струм, що протікає через діелектрик, дорівнює векторній сумі струму про- водності та струму абсорбції.

У постійних електричних полях струми абсорбції протікають лише у момент включення протягом часу встановлення поляризації або при вимкненні поля протягом часу релаксації. За завершенні процесів поляризації через діелектрик буде протікати тільки струм наскрізної провідності. У змінних полях струми зміщення протікають протягом всього часу дії поля. Отже, різниця між електропровідністю та поляризацією може бути встановлено лише у постійному електричному полі, у змінному полі ці процеси поєднуються і відмінність між ними стає умовним.

У змінному полі $E = E_0 \exp(j\omega t)$ через діелектрик тече струм, густина якого являє собою суму густини наскрізного струму $j_{\text{наскр}}$ і густини струму зміщення $j_{\text{зм}}$:

$$j = j_{\text{наскр}} + j_{\text{зм}} \quad (3.7)$$

При цьому густина наскрізного струму прямо пропорційна напруженості поля

$$j_{\text{наскр}} = \gamma \cdot \dot{E}^2,$$

а густина струму зміщення – є швидкість зміни вектора електричної індукції

$$j_{\text{зм}} = \frac{d\dot{D}}{dt} = \frac{d(\epsilon_0 \epsilon \dot{E})}{dt}.$$

У змінних електричних полях діелектрична проникність ϵ комплексною

функцією частоти

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega). \quad (3.8)$$

Фізичний зміст ε^* у тому, що вектор зміщення $\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$ (де $\varepsilon' = \varepsilon$) має дві складові: $\varepsilon' \mathbf{E}$, що знаходиться у фазі з \mathbf{E} та $\varepsilon'' \mathbf{E}$, яка відстає по фазі від \mathbf{E} на кут $\pi/2$. Оскільки $\mathbf{E} = E_0 \exp(j\omega t)$,

$$d\mathbf{D}/dt = \varepsilon \varepsilon_0 \cdot j\omega \mathbf{E}$$

та з урахуванням (3.7) можна переписати у вигляді

$$\mathbf{j} = \gamma \dot{\mathbf{E}} + j\omega \varepsilon_0 (\varepsilon' - j\varepsilon'') \dot{\mathbf{E}} \quad (3.9)$$

Таким чином, повний струм $\mathbf{j} = \mathbf{j}_a + \mathbf{j}_p$ має активну \mathbf{j}_a та реактивну \mathbf{j}_p складові виду:

$$j_a = \gamma E + \omega \varepsilon'' \varepsilon_0 E \quad (3.10)$$

$$j_p = \omega \varepsilon_0 \varepsilon' E \quad (3.11)$$

Саме активна складова обумовлює втрати електричної енергії у діелектриках (див. розділ 1).

У діелектриках наскрізна провідність порівняно мала $\gamma E \ll \omega \varepsilon'' \varepsilon_0 E$. Тому, нехтуючи величиною γE , величина діелектричних втрат може бути представлена в вигляді

$$\operatorname{tg} \delta = j_a / j_p = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (3.12)$$

Використання ε'' дуже зручне під час опису діелектричної дисперсії. Крім того, через ε'' можна виразити питому величину діелектричних втрат, що характеризують розподіл втрат енергії в об'ємі діелектрика

$$p = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2, \text{ Вт/м}^3. \quad (3.13)$$

Таким чином, протікання струму через діелектрик призводить до втрат енергії через наявність активного струму, тобто активного опору. Але крім цього, у змінному електричному полі в діелектрику виникають втрати, спричинені повільними видами поляризації. Ці втрати пов'язані з дисипацією енергії поля під час розриву міжмолекулярних зв'язків, орієнтації диполів та переміщення іонів. Пружні види поляризації не супроводжуються втратами енергії електричного поля. Високі діелектричні втрати призводять до розігріву та теплового пробою діелектриків у сильних електричних полях, зниження добротності та вибіркості коливальних контурів. У зв'язку з цим прагнуть знизити $\operatorname{tg} \delta$ діелектриків, що можливо, якщо відома природа діелектричних втрат.

3.3.3. Види діелектричних втрат у діелектриках

За фізичною природою діелектричні втрати можна поділити на п'ять основних видів:

- 1) втрати, зумовлені наскрізною електропровідністю;
- 2) втрати, зумовлені релаксаційними (повільними) видами поляризації;
- 3) втрати, зумовлені неоднорідністю структури (міграційні);
- 4) іонізаційні діелектричні втрати;
- 5) резонансні діелектричні втрати.

Діелектричні втрати, обумовлені наскрізною електропровідністю, виявляються у всіх без винятку діелектриках, як у постійних, так і в змінних електричних полях. Наскрізний електричний струм існує не тільки на постійній, але й змінній напрузі. Незалежно від зовнішнього поля, він характеризується питомою електричною провідністю γ (або питомим опором $\rho = 1/\gamma$ на постійному струмі). Наявність наскрізного струму завжди призводить до розсіювання потужності в одиниці об'єму діелектрика:

$$p = \gamma E^2 . \quad (3.14)$$

Цю частину діелектричних втрат, обумовлену наскрізним струмом, називають діелектричними втратами на електропровідність.

Потужність втрат на електропровідність, як видно з (3.14), не залежить від частоти. Однак, тангенс кута діелектричних втрат, обумовлених наскрізним струмом,

$$\operatorname{tg} \delta = \gamma / (\omega \omega \epsilon_0 \epsilon) = 1,8 \cdot 10^{10} / (f \epsilon \rho) , \quad (3.15)$$

обернено пропорційний частоті $\omega = 2\pi f$ (ϵ слабо залежить від частоти).

Позначимо

$$\gamma_{\text{акт}} = f \epsilon \rho \operatorname{tg} \delta / 1,8 \cdot 10^{10} , \text{ См/м} \quad (3.16)$$

$\gamma_{\text{акт}}$ – питома активна провідність на змінній напрузі.

Діелектрик з втратами на електропровідність можна, за формальною ознакою, представити у вигляді послідовної схеми заміщення (рис. 3.1): C_s , R_s – елементи схеми заміщення діелектрика, ємність якої визначає процеси поляризації, активний опір – втрати енергії на електропровідність.

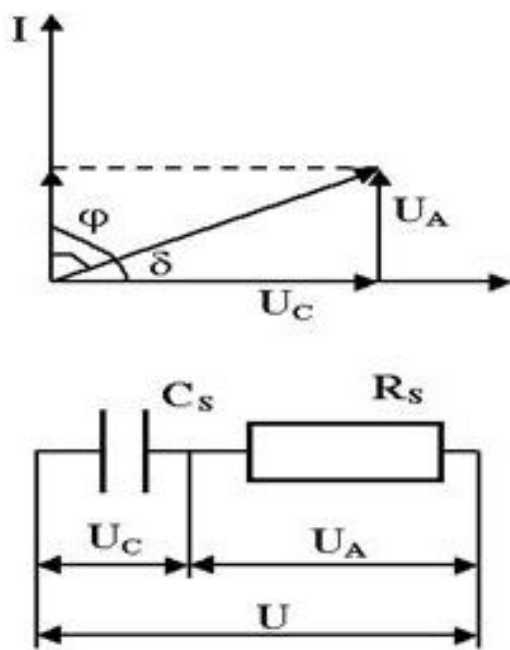


Рисунок 3.1 – Послідовна схема заміщення діелектрика з втратами на електропровідність

На високих частотах (рис.3.2, *a*) (при $\rho > 10^{10}$ Ом·м – вище 10 кГц) $\text{tg}\delta$, обумовлений наскрізним струмом, дуже малий – менше 10^{-4} . Втрати на електропровідність суттєві лише за низьких частот (0,0010 ... 1000) Гц.

При підвищенні температури T втрати на електропровідність ((рис.3.2, *a*) зростають у вузькому діапазоні за експоненційним законом:

$$\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_0 e^{\alpha T} \quad , \quad (3.17)$$

де α і T – постійні, характерні для даного діелектрика.

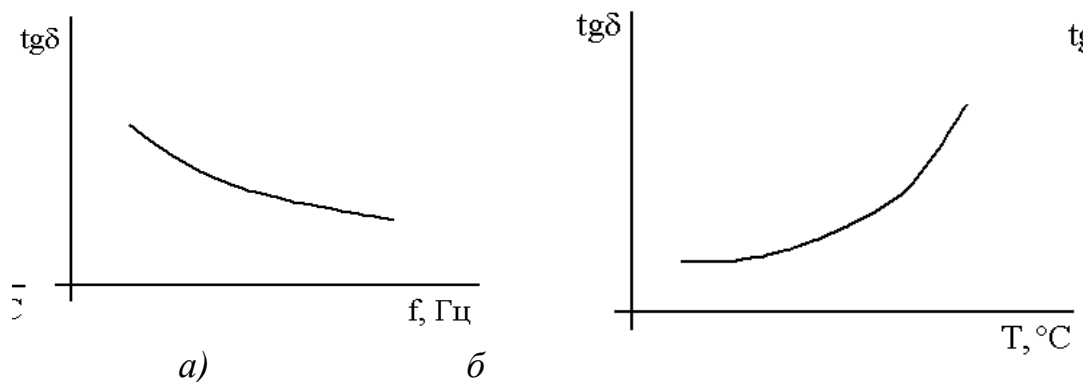


Рисунок 3.2 – Типові частотна (*a*) та температурна (*б*) залежності тангенсу кута діелектричних втрат на електропровідність у діелектрику

Така поведінка пов'язана з експоненційним зростанням провідності діелектрика при підвищених температурах (для рідких та твердих діелектриків, див. лабораторну роботу 4).

Діелектричні втрати, зумовлені релаксаційними (повільними) видами поляризації можуть проявлятися в полярних діелектриках і тільки в змінному електричному полі (рис. 3.3). На частотній залежності проявляється релаксаційний максимум втрат.

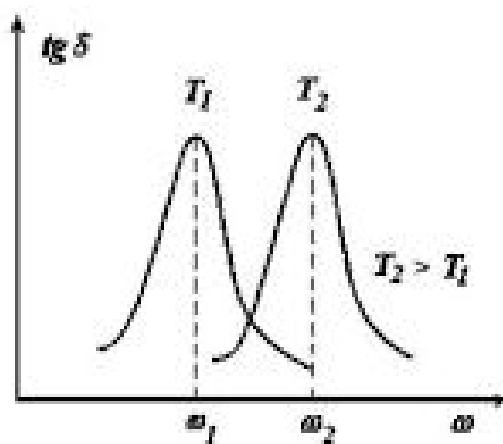


Рисунок 3.3 – Типова частотна залежність $\text{tg } \delta$ на дипольну релаксаційну поляризацію з одним часом релаксації при температурах T_1 та T_2 ($T_1 < T_2$). З підвищенням температури максимум втрат зміщується у діапазон більш високих частот

Діелектрик з втратами на поляризацію можна представити у вигляді паралельної схеми заміщення (рис. 3.4): C_p , R_p – елементи схеми заміщення діелектрика, ємність якої визначає процеси поляризації, активний опір – втрати енергії на поляризацію.

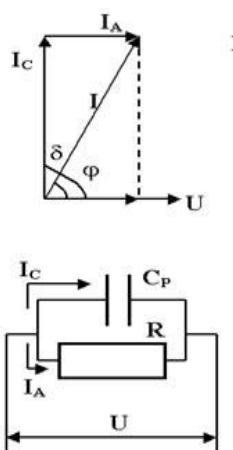


Рисунок 3.4 – Паралельна схема заміщення діелектрика з втратами на поляризацію

Робота, що витрачається електричним полем на поляризацію одиниці об'єму діелектрика:

$$A = \int \dot{P} d\dot{E} \quad (3.18)$$

Якщо поле синусоїдальне, то робота за період визначається інтегралом по замкнутому контуру $P(E)$, тому що через період $1/f$ як P , так і E повертаються до вихідного значення:

$$A = \oint \dot{P} d\dot{E} \quad , \quad (3.19)$$

тобто вона дорівнює площі петлі $P(E)$ (рис. 3.5).

1. Якщо час встановлення поляризації τ значно менший за період зміни електричного поля $1/f$ і P встигає слідувати за E (рис. 3.5, а), то енергія на поляризацію за період не витрачається: робота, що здійснюється під час подачі електричного поля, повністю віддається діелектриком при знятті поля, і $\oint P dE = 0$.

2. У разі, коли τ порівняно з $1/f$, поляризація не встигає повністю встановитися за період зміни поля, поляризованість P відстає по фазі від напруженості E (рис. 3.5, б, в – петля діелектричного гістерезису, обумовлена спонтанною поляризацією – див. Розділ I.1.3), та $\oint P dE > 0$. Таким чином, на поляризацію витрачається енергія електричного поля, що переходить у діелектричні втрати.

3. Нарешті, при $\tau \gg 1/f$ поляризація зовсім не встигає встановитися за півперіод зміни електричного поля, що змінює знак, і $P = 0$, звідки $\oint P dE = 0$.

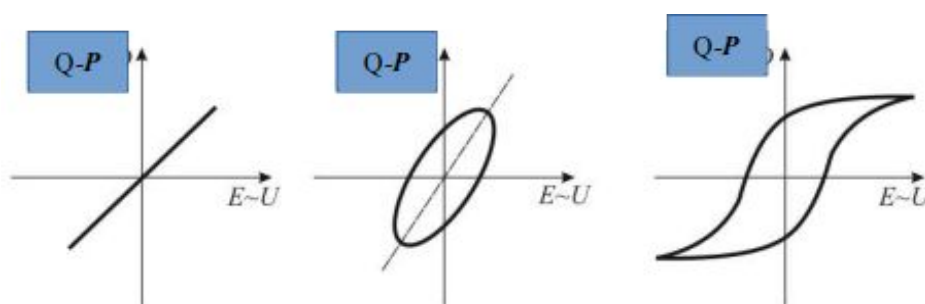


Рисунок 3.5 – Залежність заряду Q (вектора поляризації P) від напруженості електричного поля E (напруги U) у діелектриках з різними видами поляризації: ліворуч – миттєвими (пружними), посередині – з релаксаційно-дипольною та праворуч – зі спонтанною

Площа еліпсу (рис. 3.5, б) та петлі гістерезису (рис. 3.5, в) пропорційна

втратам енергії, тобто тангенсу діелектричних втрат, на релаксаційно-дипольну та спонтанну поляризації у діелектриках. Отже, діелектричні втрати на поляризацію максимальні, коли період зміни електричного поля порівняти з часом встановлення поляризації τ . Якщо частота поля $f > 1/\tau$, поляризація не встигає слідувати за змінами поля (рис. 3.3, права частина частотної залежності $\text{tg}\delta$). У області частот $f \approx 1/\tau$ спостерігається зменшення діелектричної проникності зі збільшенням частоти, зване діелектричною дисперсією.

В полярних діелектриках дипольно-релаксаційні втрати можуть спостерігатися в широкому частотному інтервалі до $(10^6 - 10^{10})$ Гц. До таких самих частот спостерігаються іонно-релаксаційні втрати. Часто релаксаційні діелектричні втрати накладаються на втрати на електропровідність і тоді залежність діелектричних втрат має вигляд, показаний на рис. І.13.

Міграційні втрати існують у таких неоднорідних діелектриках, як гетинакс, текстоліт, слюдопласти, наповнені та керамічні матеріали. У гігроскопічних діелектриках (папір, пінопласт, пориста кераміка тощо) міграційні втрати виникають при зволоженні, оскільки провідність води велика. Тому $\text{tg}\delta$ помітно зростає зі збільшенням вологості.

Іонізаційні втрати або втрати на часткові розряди спостерігаються у пористих твердих діелектриках при підвищенні напруги понад певну межу $U_{\text{іон}}$, званого порогом іонізації. При напрузі вище $U_{\text{іон}}$ у повітряних включеннях або інших дефектах всередині діелектрика з'являються часткові розряди, що призводять до розсіювання енергії електричного поля. Діелектричні втрати, обумовлені іонізацією діелектрика в електричному полі, називають іонізаційними діелектричними втратами.

Резонансні втрати електронної поляризації мають максимуми в оптичному діапазоні: інфрачервоній, видимій та ультрафіолетовій областях спектру (на частотах $10^{14} \dots 10^{17}$ Гц). З ними пов'язане поглинання світла речовиною. Втрати супроводжуються частотною залежністю показника заломлення та максимальні в області так званої «аномальної» дисперсії, де ϵ знижується зі зростанням частоти (під «нормальною» дисперсією в оптиці мають на увазі збільшення показника заломлення зі зростанням частоти). Максимуми резонансних втрат іонної поляризації спостерігаються в інфрачервоному діапазоні на частотах $(10^{13} \dots 10^{14})$ Гц. Однак у речовинах з високою діелектричною проникністю, а також у скло та ситали, де ϵ слабо пов'язані іони, частоти іонного резонансу можуть бути і нижче (10^{12} Гц). У цьому випадку початок резонансного максимуму втрат захоплює діапазон надвисокої частоти ($10^9 \dots 10^{10}$) Гц).

3. 4. Метод візуалізації процесу поляризації та вимірювання втрат енергії

3.4.1. Візуалізація залежності між напруженістю електричного поля та вектором поляризації здійснено осцилографічним методом.

Спостереження кривої поляризації сегнетоелектриків здійснюється за відомою схемою Сойера-Тауера (рис. 3.6).

На схемі позначені:

R_1, R_2 – подільник напруги; C_x – зразок; C_0 – зразковий конденсатор великої ємності; R_t – терморезистор; УГ – генератор з амплітудою сигналу, що перебудовується.

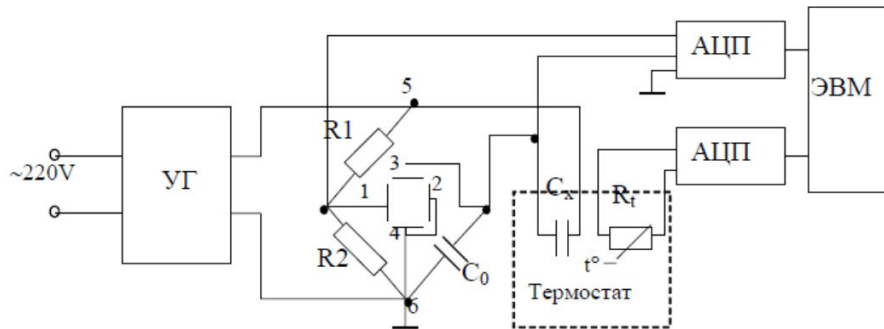


Рисунок 3.6 – Узагальнена схема спостереження кривої поляризації у діелектриках

На перший канал осцилографа (розгортка по вертикалі (вхід «У»)) потрібно подати напругу U_x , пропорційну величині заряду q (або поляризованості P). На другий канал (розгортка по горизонталі) (вхід «Х») – напруга U_y , пропорційна величині напруги U_c , на досліджуваному конденсаторі.

Досліджуваний конденсатор C з'єднано послідовно з іншим конденсатором C_e (рис. 3.6 – рис. 3.7). Ємність конденсатора $C_e = \text{const}$ і значно більша ємності досліджуваного конденсатора C . Змінна напруга $U \sim$ подається на послідовно з'єднані конденсатори C (досліджуваний зразок) і C_e . Оскільки величина ємності $C_e \gg C$, то $U_c \gg U_e$ і можна вважати, що $U_c \approx U \sim$.

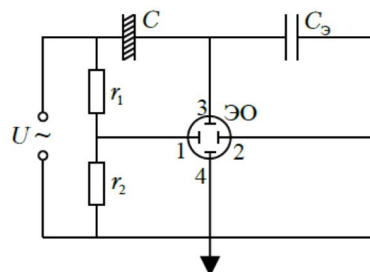


Рисунок 3.7 – Підключення досліджуваного конденсатора до осцилографу

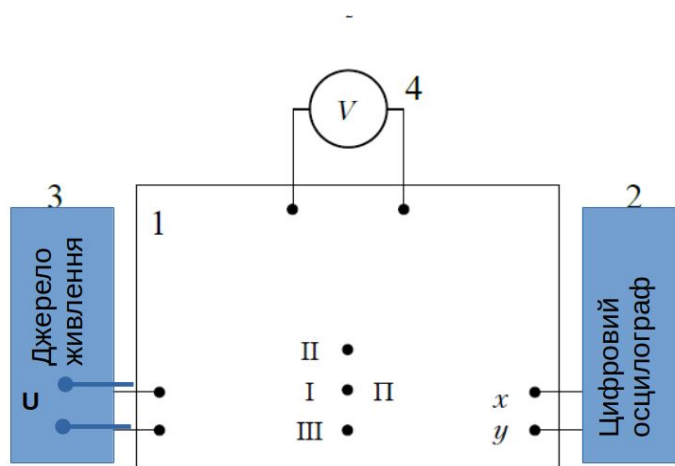


Рисунок 3.8 – Блок- схема установки

Напруженість електричного поля в зразку дорівнює

$$E = \frac{U}{h}, \quad (3.20)$$

де h – відстань між пластинами досліджуваного конденсатора C .

З (3.20) виходить, що на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа (канал 1) подається напруга U_x , пропорційна напруженості поля E в досліджуваному конденсаторі C .

На вертикально відхиляючі пластини 3 – 4 (канал 2) подається напруга U_y з еталонного конденсатора C_e , пропорційно величині поляризації P .

Ємності C і C_e з'єднані послідовно, відповідно

$$q = C \cdot U_x = C_e \cdot U_e,$$

де q – заряд на пластині конденсатора, звідки:

$$U_e = \frac{C \cdot U_x}{C_e} = \frac{q}{C_e}. \quad (3.21)$$

Оскільки

$$q = \sigma \cdot S,$$

де σ – поверхнева густина заряду,

S – площа пластин (обкладок) конденсатора C ,

напруга визначається як:

$$U_e = U_y = \frac{\sigma \cdot S}{C_e} \quad (3.21)$$

Поляризованість P дорівнює поверхневій густині зарядів σ :

$$P = \sigma,$$

відповідно

$$U_e = U_y = \frac{S}{C_e} P \quad (3.22)$$

Таким чином, з каналу 2 (вертикальна розгортка) подається напруга, пропорційна вектору поляризації діелектрика P .

На екрані персонального комп'ютера, що застосовується у комплексі з цифровим осцилографом, при повному циклі зміни напруженості електричного поля E отримуємо (у відповідному масштабі) залежність $P = f(E)$ (рис. 3.9).

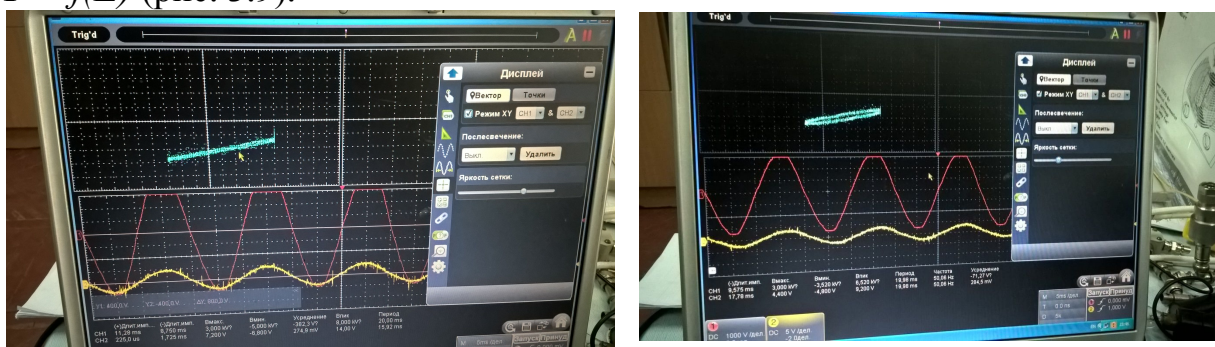


Рисунок 3.9 – Експериментальні залежності між вектором поляризації та напруженістю електричного поля при дослідженні конденсаторів з неполярним діелектриком (поліпропіленовою плівкою) (ліворуч) та полярним (поліетилентерефталатною плівкою) (праворуч)

3.4.2. Вимірювання частотної залежності у діапазоні частоти 100 Гц – 100 кГц тангенсу кута діелектричних втрат виконано із застосуванням цифрового вимірювача ємності і імпеданса серії DER EE LCR Meter De – 5000.

При проведенні вимірювань зразків, що досліджуються, вибирається режим вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат за паралельної схеми заміщення. Різниця між результатами вимірювань ємності за паралельної C_p і послідовної C_s схемами заміщення може бути істотною для конденсаторів з діелектриками, втрати в яких значні:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \text{tg}^2 \delta} \dots$$

3.5. Опис приладів для візуалізації та вимірювання діелектричних втрат у діелектриках.

Для проведення досліджень застосовується лабораторний стенд, що складається з:

- 1) двоканального цифрового осцилографу VDS OWON;
- 2) керуючого комп'ютера (ПК) з програмним забезпеченням;
- 3) джерела змінної напруги В7-4;
- 4) генератора сигналів;
- 5) цифрового вимірювача RLC Meter DE-5000 (див. розділ 2.5.2).

3.5.1. Технічні характеристики осцилографу серії OWON VDS1022

На рис. 3.10 наведено загальний вигляд цифрового осцилографу VDS OWON VDS1022I.

Смуга пропускання - 25 МГц. Частота дискретизації у реальному часу у двоканальному режимі - 100 Гц. Вхідний імпеданс - $1\text{ МОм} \pm 2\%$, паралельно з $10 \pm 5\text{ пФ}$.



- 1 – Порт USB;
2 – Компенсація щупа: вихід тестового сигналу (5 В / 1 кГц);
3 – Багатоцільовий порт (MULTI port);
4 – Вхід сигналу в канал 2;
5 – Вхід сигналу в канал 1.

Рисунок 3.10 – Загальний вигляд осцилографу VDS1022

Максимальна вхідна напруга - 400 В (розмах) (постійна напруга + розмах змінної напруги). Ізоляція між каналами - 50 Гц: 100:1 100 МГц: 40:1. Затримка сигналу - 150 пс. Порт обміну даними — USB. Напруга живлення - 5,0 В / 500 мА. Вихідна напруга компенсатору щупа - близько 5 В, імпеданс $\geq 1\text{ МОм}$.

У табл. 3.1- табл. 3.2 наведено дані щодо горизонтальної та вертикальної системи осцилографу, табл. 3.3 – функціональні можливості, табл. 3.4 – характеристики запуску осцилографу VDS OWON VDS1022I вимірювального стенду.

Таблиця 3.1 – Горизонтальна система

Діапазон частоти дискретизації	VDS1022(I)		2-канальний режим	0,5Гц-100МГц
			1-канальний режим	0,5Гц-100МГц
Інтерполяція	$\sin(x)/x$			
Максимальна довжина запису	VDS1022 (I)	2-канальний режим	\leq макс. частота дискретизації	5К
		1-канальний режим		
Швидкість сканування (с/поділ)	VDS1022 (I)	5 нс / поділ - 100 с / поділ з кроком 1-2-5		
Похибка частоти дискретизації	± 10 ppm (точок на мільйон, 10^{-5})			
Похибка тимчасових інтервалів ΔT (0-100 МГц)	Одиночна вибірка: $\pm (1$ інтервал дискретизації + $10^{-4} \times$ показання + 0,6 нс) Усереднення > 16 : $\pm (1$ інтервал дискретизації + $10^{-4} \times$ показання + 0,4 нс)			

Таблиця 3.2 – Вертикальна система

Аналого-цифровий перетворювач	VDS1022(I)	розрядність 8 біт (одночасно два канали)
Ціна поділки вертикальної шкали	VDS1022(I)	5 мВ / поділ - 5 В / поділ
Зсув	VDS1022(I)	± 10 поділів
Аналогова смуга пропускання	25 МГц, 50 МГц, 60 МГц, 100 МГц	
Одиночна смуга пропускання	Повна смуга пропускання	
Низькочастотна межа	≥ 10 Гц (при зв'язку по змінному струмі, -3 дБ)	
Час наростання фронту	VDS1022(I)	≤ 14 нс (на вході, типове)
Похибка постійної напруги	$\pm 3\%$	
Похибка постійної напруги (при усередненні)	При числі усереднення ≥ 16 : $\pm (3\% + 0,05$ ділення)	
Інвертування осцилограми: включається по запиту		

Таблиця 3.3 – Функціональні можливості щодо вимірювання

Курсорні вимірювання		Різниця потенціалів (ΔV) і часовий інтервал (ΔT) між курсором
Автоматичні вимірювання		Розмах (V_{pp}), максимальне (V_{max}), мінімальне (V_{min}), середнє (V_{avg}), середньоквадратичне (V_{rms}) значення напруги, амплітуда (V_{amp}), значення верхнього (V_{top}) і нижнього (V_{base}) плоских горизонтальних ділянок сигналу, величини позитивного викиду на фронті сигналу ($Overshoot$) і негативного викиду перед фронтом сигналу ($Preshoot$), частота ($Frequency$), період ($Period$), час наростання переднього ($Rise\ Time$) і зменшення заднього ($Fall\ time$) фронту імпульсу, величину затримки 1 \rightarrow 2 ($Delay\ 1\ \rightarrow\ 2$) і затримки 1 \rightarrow 2 ($Delay\ 1\ \rightarrow\ 2$), ширина (+ $Width$, - $Width$) і коефіцієнт заповнення (+ $Duty$, - $Duty$) позитивного і негативного імпульсів.
Математичні операції над осцилограмами		+ , - , * , / , швидке перетворення Фур'є
Фігури Ліссажу	Частотний діапазон	Повна смуга пропускання
	Похибка різниці фаз	$\pm 3^\circ$

Таблиця 3.4 — Характеристики запуску осцилографу

Діапазон рівнів запуску	Внутрішній	± 5 поділок від середини області відображення осцилограми	
Похибка рівня запуску (типова)	Внутрішній	$\pm 0,3$ ділення	
	Зовнішній (EXT)	TTL	
Зсув точки запуску	Залежно від довжини запису і тимчасової розгортки		
Діапазон затримки запуску	100 нс – 10 с		
Налаштування на рівень 50% амплітуди сигналу (типова)	Частота вхідного сигналу ≥ 50 Гц		
Запуск по фронті	Нахил фронту	Наростаючий, неспадаючий	
Запуск по імпульсу	Умова запуску	Позитивний імпульс	
	Діапазон ширини імпульсу	VDS1022(I)	30 нс – 10 с
Запуск по відеосигналу	Модуляція	Підтримуються стандарти систем телемовлення NTSC, PAL і SECAM	
	Діапазон номерів рядків	1-525 (NTSC) 1-625 (PAL/SECAM)	
Запуск по нахилу фронту	Умова запуску	Позитивний імпульс: >, <, = Негативний імпульс: >, <, =	
	Діапазон часу	VDS1022(I)	24 нс – 10 с
Почерговий запуск	Запуск в каналах CH1, CH2	По фронті, по імпульсу, по відеосигналу *, по нахилу фронту	

3.5.2 Технічні характеристики та принципова електрична схема джерела змінної напруги частоти 50 Гц В7-4

Випрямляч В-24, зовнішній вигляд якого показаний на рис. 3.11, здійснює перетворення змінного електричного струму частотою 50 Гц і напругою 220 В в змінний струм з плавно регульованою напругою від 0 до 30 В і силою струму до 10 А, а також в випрямлений струм з плавно регульованою напругою від 0 до 24 В і силою струму до 10 А. Максимальна потужність, споживана випрямлячем, може досягати 500 Вт. Габаритні розміри 350x200x210 мм. Маса не більше 8,7 кг. Корпус випрямляча складається з двох частин: передньої стінки і знімного кожуха. На передній стінці встановлені тороїдальний трансформатор, деталі випрямляча, щиток з запобіжником, колодка для приєднання мережевого шнура. На лицьовій частині передньої панелі розміщені вольтметр 1 і амперметр 2, що вимірюють напругу і силу випрямленого струму, ручка плавного регулювання вихідної напруги 3, вихідні гнізда 4 і 5, індикаторна лампа 6 і тумблер включення приладу 7.

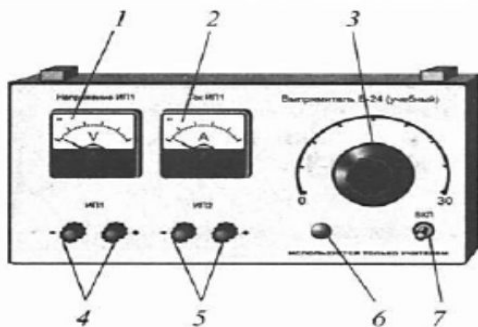


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд випрямляча В-24 з показаннями вольтметра

Принципова схема випрямляча показана на рис. 3.12. У випрямлячі застосована мостова схема, що дозволяє отримати випрямлену напругу з частотою пульсацій 100 Гц. Загальна сила струму на виходах випрямляча не повинна перевищувати 10 А. Випрямляч повинен живитися від розподільного щита, обладнаного швидкодіючим вимикачем УЗОШ. Перед експлуатацією випрямляч слід заземлити. Клема для заземлення розташована на задній поверхні кожуха. Загальна сила струму випрямленого і змінного на виході випрямляча не повинна перевищувати 10 А. Час безперервної роботи випрямляча не більше 45 хв.

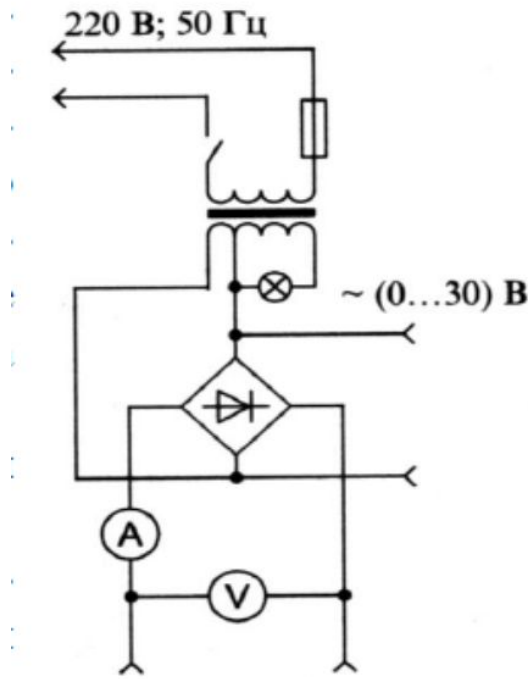


Рисунок 3.12 – Принципова схема випрямляча

3.6. Методика виконання лабораторної роботи

Дослідити зразки конденсаторів з: неполярною поліпропіленовою плівкою; полярною поліетилентерефталатною плівкою; керамічним діелектриком, який можна віднести до активного діелектрика відповідно до класифікації конденсаторів в залежності від діелектрика.

Класифікація конденсаторів в залежності від діелектрика:

K10 – керамічні на номінальну напругу до 1600; K15 – керамічні на номінальну напругу 1600 В і вище; K20 – кварцові; K21 – скляні; K22 - склокерамічні; K23 – склоемалеві; K31 - слюдяні малої потужності; K32 - слюдяні великої потужності; K40 – паперові на номінальну напругу до 2 кВ із обкладками з фольги; K41 - паперові на номінальну напругу 2 кВ та вище з обкладками з фольги; K50 – електролітичні фольгові алюмінієві; K51 - електролітичні фольгові танталові, ніобієві та ін.; K52 - електролітичні об'ємно-пористі; K53 – напівпровідникові оксидні; K54 – металеві оксидні; K60 – повітряні; K61 - вакуумні; K71 - полістирольні; K72 - фторопластові; K73 - поліетилентерефталатні (лавсанові) K72 - комбіновані; K76 - лакоплівкові; K77 – полікарбонатні.

3.6.1. Підготовка стенду до роботи

1. Провести калібрування осцилографа.

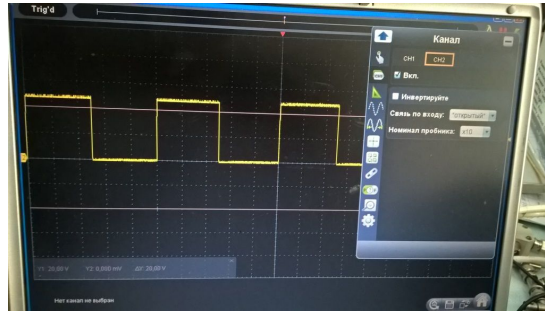


Рисунок 3.13 – Сигнал калібрування

2. Підключити послідовно з'єднаний зразок конденсатору з еталонним, ємність котрого у 10 разів перевищує ємність дослідного, до джерела напруги В7-24.

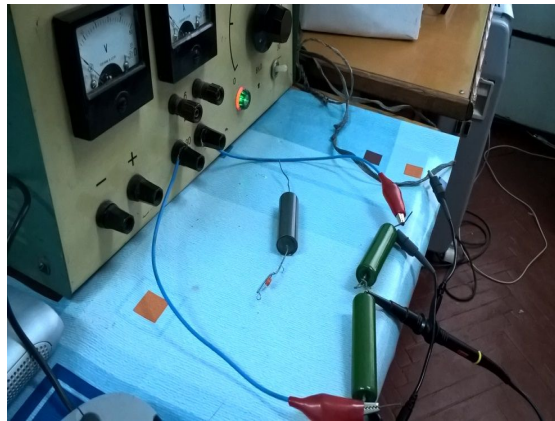


Рисунок 3.14 – Підключення дослідного та еталонного конденсаторів до джерела змінної напруги В7-4

3. Підключити дослідний та еталонний конденсатори за допомогою з'єднувальних проводів до цифрового осцилографу.

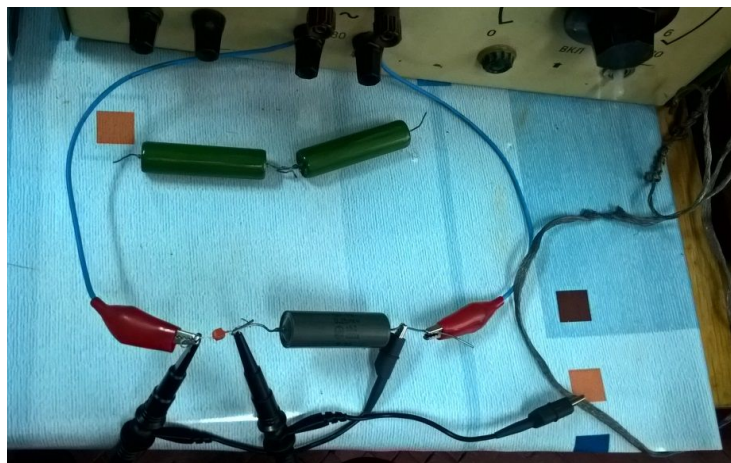


Рисунок 3.15 – Підключення дослідного та еталонного конденсаторів до цифрового осцилографу (нижня частина фото)

4. Підключити еталонний конденсатор до першого каналу осцилографу (горизонтальна розгортка) для спостереження у режимі реального часу прикладеної напруги (напруженості електричного поля).

5. Підключити конденсатор, що досліджується, до другого каналу осцилографу (вертикальна розгортка) для спостереження у режимі реального часу заряду (вектора поляризації).

6. Отримати на екрані ноутбуку розгортки напруженості електричного поля та вектора поляризації зразків конденсаторів, що досліджуються.



Рисунок 3.16 – Осцилограми напруженості електричного поля (червона крива) та вектора поляризації (жовта крива) конденсатора з полярним діелектриком.

7. Провести вимірювання електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат у зразках конденсаторів у діапазоні частоти 100 Гц — 100 кГц за допомогою цифрового вимірювача ємності і імпеданса серії DER EE LCR Meter De – 5000.

8. Результати вимірювань занести у таблицю.

9. Побудувати частотні залежності електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат зразків конденсаторів.

10. Виконати аналіз отриманих результатів досліджень для кожного зразка окремо та у сукупності.

11. Порівняти результати отриманих осцилограм між напруженістю електричного поля та вектором поляризації з частотними залежностями ємності і тангенсом кута діелектричних втрат для кожного зразка окремо та у сукупності.

12. Оформити звіт.

3.7.Контрольні питання

1. Що характеризує вектор поляризації P та у яких одиницях вимірюється?

2. Як співвідносять вектор поляризації та напруженість електричного поля у лінійних діелектриках?

3. Що визначає вектор електричного зміщення?

4. Що характеризує час встановлення поляризації τ ?

5. Як визначається час релаксації поляризації?
6. Які складові має густина струму при прикладанні до діелектрика змінної напруги?
7. Яка складова струму обумовлює втрати електричної енергії у діелектрику?
8. Як визначається тангенс кута діелектричних втрат з урахуванням комплексної діелектричної проникності?
9. Що характеризує питома величина діелектричних втрат?
10. Чим обумовлено залежність тангенсу кута діелектричних втрат на електропровідність від частоти та температури ?
11. Яка схема заміщення діелектрика з втратами на електропровідність?
12. Чим обумовлено залежність тангенсу кута діелектричних втрат на дипольно-релаксаційну поляризацію від частоти?
13. Чому зі збільшенням температури змінюється значення $\text{tg}\delta$ діелектрика з дипольно-релаксаційним механізмом поляризації?
14. Яка схема заміщення діелектрика з втратами на поляризацію?
15. Як визначається робота, що витрачається електричним полем на поляризацію одиниці об'єму діелектрика?
16. Яка залежність спостерігається між вектором поляризації та напруженістю електричного поля у лінійних діелектриках?
17. Чим пояснюється петля діелектричного гістерезису у активних діелектриках?
18. Як впливає частота f електричного поля на роботу, що витрачається електричним полем на поляризацію об'єму діелектрика?
19. Чим обумовлено іонізаційні втрати у пористих твердих діелектриках при підвищенні напруги ?
20. У якому діапазоні частоти проявляються резонансні частоти в залежності від типу поляризації у діелектриках?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

4.1. Мета та завдання роботи

Метою роботи є:

1. з'ясування причин виникнення електропровідності діелектриків;
2. засвоєння понять «електропровідність», «питома провідність», «питомий опір»;
3. освоєння стандартної методики вимірювання питомого об'ємного (ρ_v) та питомого поверхневого (ρ_s) опорів твердих діелектриків;

Завданням роботи є вимірювання об'ємного та поверхневого опорів при заданій напрузі і визначення за розрахунковими формулами чисельних значень ρ_v і ρ_s досліджуваного діелектрика.

4.2. Підготовка до роботи.

У процесі підготовки до роботи до її виконання необхідно:

1. засвоїти мету та завдання роботи, ознайомитись з експериментальними зразками, визначити, який діелектричний матеріал у них використовується, а також з'ясувати, чим відрізняються зразки між собою;
2. вивчити теоретичні положення до роботи, виписати для звіту та запам'ятовування основні розрахункові формули та основні визначення термінів та понять, таких як «електропровідність», «питома провідність», «питомий об'ємний та питомий поверхневий опір», «рухливість носіїв заряду»;
3. розібратися у схемі вимірів, навіщо визначити, які прилади використовують у роботі, які функціональні можливості, тобто, межі вимірювань або змін (регулювання) вихідної напруги живлення, способи індикації вимірюваних або вихідних сигналів, а також – як зразки підключаються до вимірювальних приладів;
4. вивчити методику виконання, тобто, послідовність дій у процесі вимірювань та підготувати таблиці вимірювань з обов'язковим зазначенням одиниць вимірів.

4.3. Теоретичні положення до роботи

4.3.1. Електропровідність та фізична природа струмів у діелектриках

Необхідною умовою наявності електропровідності у будь-якої речовини є існування в ній вільних заряджених матеріальних частинок - носіїв зарядів. За наявності електричного поля на кожний носій струму діє

електрорушійна сила E .

Густина струму j дорівнює заряду q , що протікає в одиницю часу через одиничний переріз зразка за заданої напруженості зовнішнього електричного поля E , тобто.

$$j=qnv, \quad (4.1)$$

де q - заряд електрона,

n – концентрація носіїв заряду,

v – швидкість спрямованого руху носіїв заряду в електричному полі напруженістю E .

Відповідно до закону Ома у диференційній формі, густина струму j пропорційна напруженості електричного поля E . Коефіцієнтом пропорційності є питома провідність γ (для області слабких електричних полів не залежить від напруженості електричного поля):

$$j=\gamma \cdot E. \quad (4.2)$$

На підставі (4.1) та (4.2) можна записати:

$$\gamma=qnv/E=qnu, \quad (4.3)$$

де $u=v/E$ ($m^2/V \cdot s$) – рухливість носіїв заряду і дорівнює швидкості спрямованого руху носіїв в електричному полі одиничної напруженості.

Для повітря за нормальних умов у слабких полях рухливість негативних іонів $u^- = 1,87 \cdot 10^{-46} m^2/V \cdot s$, позитивних іонів – $u^+ = 1,37 \cdot 10^{-4} m^2/V \cdot s$; рухливість електронів внаслідок їх малої маси більша, ніж рухливість іонів, і становить близько $3700 \cdot 10^{-4} m^2/V \cdot s$, тобто, практично, у 1000 разів вище, ніж у іонів. У рідких діелектриках при температурі 1,18K $u^- = 7 \cdot 10^{-6} m^2/V \cdot s$, $u^+ = 9 \cdot 10^{-6} m^2/V \cdot s$. У діелектриках рухливість іонів ще нижче. Наприклад, в алюмосилікатній кераміці становить лише (10^{-13} - 10^{-16}) $m^2/V \cdot s$, а у електронів $\sim 10^{-4} m^2/V \cdot s$.

Формула (4.3) не пов'язана з природою носія заряду, тому є загальною для всіх можливих видів електропровідності.

Тверде тіло складається із атомів, тобто, з ядер атомів та електронів. Ядра атомів утворюють кристалічну ґратку, яка має просторову періодичність. Рух електронів у твердому тілі еквівалентний руху електронів у просторово періодичному полі. При описі руху електрона в періодичному полі кристалічних ґраток квантова механіка дає такі результати, які зручно порівнювати з квантово-механічними результатами для ізольованого атома. Електрони в ізольованому атомі мають дискретні значення енергії, а спектр вільного атома представляє набір дискретних

спектральних ліній. При об'єднанні N однакових атомів, що утворюють тверде тіло, кожен рівень енергії розщеплюється на N рівнів, що близько лежать, які утворюють зону. Таким чином, замість системи окремих рівнів енергії у твердому тілі з'являється система енергетичних зон, кожна з яких складається з близько розташованих рівнів. Зони дозволених енергій відокремлені одна від одної деяким інтервалом, званим забороненою зоною (W_g , рис.4.1). Енергетичні "відстані" між дозволеними зонами (тобто ширина заборонених зон) визначається енергією зв'язку електронів з атомами решітки.

Електричні властивості тіл залежать від ширини забороненої енергетичної зони та відмінностей у заповненні дозволених зон.

Існування у дозволених зонах вільних енергетичних рівнів є необхідною умовою виникнення провідності. На цей рівень поле сторонніх сил може перенести електрон.

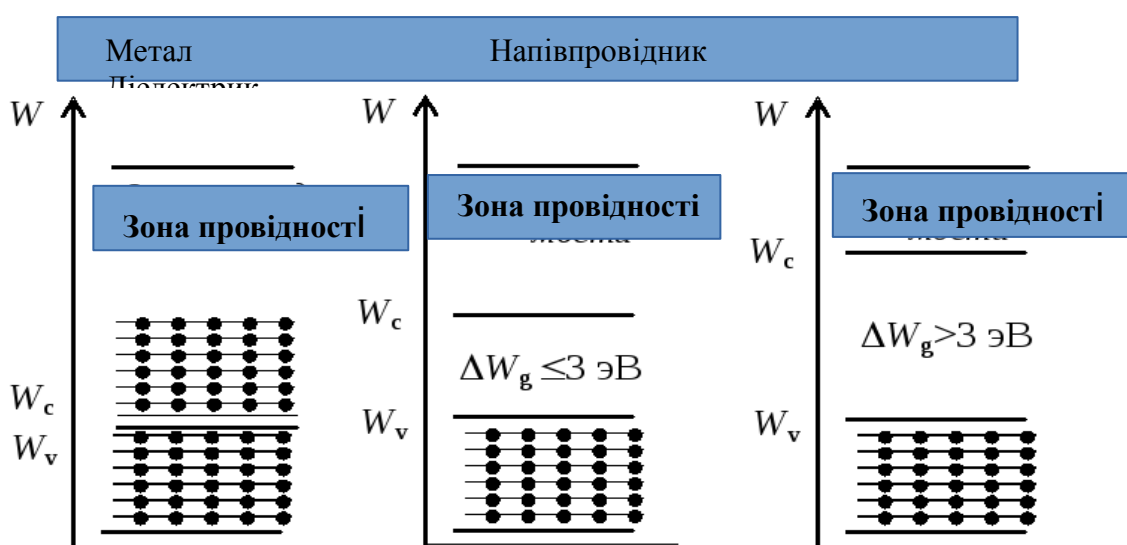


Рисунок 4.1 - Структура енергетичних зон твердого тіла

Зону, яка є порожньою або заповнена лише частково, визначається як зона провідності (W_c).

У свою чергу, зона, заповнена електронами повністю, зветься валентною (W_v).

Метали, діелектрики та напівпровідники відрізняються в області ступеня заповнення валентної зони електронами та шириною забороненої зони. **Ширина забороненої зони – це найважливіший параметр напівпровідників та діелектриків та багато в чому визначає їх властивості, у тому числі електропровідність.**

Якщо в елементів частина рівнів вільна або на основну зону накладається вільна, незайнята зона, то такі елементи мають яскраво виражені металеві властивості. Розподіл електронів з енергії в металі визначається статистикою Фермі-Дірака. У металів зона провідності є

частково заповненою і має вільні верхні рівні. За умови, що температура $T=0$, валентні електрони попарно заповнюють нижні рівні валентної зони. Локалізованим на верхніх рівнях електронам для того, щоб перевести їх на вищі рівні, достатньо підвести енергію ($10^{-23} - 10^{-22}$) еВ. [Електрон-вольт — позасистемна одиниця енергії. Енергію один електрон-вольт набуває один електрон, коли проходить через електростатичний бар'єр з потенціалом один вольт. $1 \text{ eV} = 1,602\ 176\ 565\ (35) \times 10^{-19}$ Дж].

У напівпровідниках та діелектриках зона валентних електронів повністю заповнена, а найближча вільна зона — зона провідності відокремлена від неї забороненою зоною. Для діелектриків ширина забороненої E досягає кількох електрон-вольт ($E > 3,0$ еВ), для напівпровідників вона значно менша, наприклад, для германію $E = 0,72$ еВ.

У кристалічних напівпровідників ширина забороненої зони між повністю заповненою валентною зоною та першою незаповненою зоною досить мала. Якщо ширина забороненої зони еквівалентна декільком десятим еВ, енергії теплового руху вистачає для того, щоб перевести електрони у вільну зону провідності. При цьому можливий перехід електрона всередині валентної зони на рівні, що звільнилися.

У діелектриків перша, що є незаповненою зона, відокремлена від повністю заповненої нижньої зони широкою забороненою зоною. Щоб перевести електрон у вільну зону, необхідно надати значну енергію, еквівалентну ширині забороненої зони. Ширина забороненої зони діелектриків дорівнює кільком електрон вольтам. Тепловий рух не може перевести у вільну зону велику кількість електронів.

У твердому реальному діелектрику за рахунок недосконалості структури та наявності домішок є незначна кількість вільних носіїв заряду, які під дією зовнішнього електричного поля забезпечують протікання наскрізного струму ($i_{нс}$) (струму наскрізної провідності) - струму витоку. Величина цього струму визначається кількістю вільних носіїв і зазвичай лежить в області 10^{-9} А.

Носіями заряду можуть бути електрони (дірки), іони та моліони - заряджені групи молекул (колоїдні частинки). У зв'язку з цим за типом носіїв заряду розрізняють електронну, іонну та моліонну електропровідність.

Електропровідність – здатність речовини проводити електричний струм під впливом постійного електричного поля.

Особливість діелектриків — процес поляризації, обумовлений зміщенням пов'язаних зарядів під дією зовнішнього електричного поля щодо положення рівноваги. Зсув пов'язаних зарядів зумовлює протікання поляризаційних струмів (струмів зміщення) – струмів абсорбції ($i_{аб}$). Вони виникають тільки в момент увімкнення та вимкнення зовнішнього постійного електричного поля.

В змінному електричному полі струми абсорбції мають місце за

зміни фази напруженості зовнішнього поля, тобто, вони протікають весь час, доки прикладене зовнішнє електричне поле.

При підключенні зразка діелектрика до джерела постійної напруги в початковий момент протікають обидва струми – струм наскрізної провідності $i_{нс}$, обумовлений наявністю вільних носіїв зарядів, та струм абсорбції $i_{аб}$, обумовлений процесами поляризації. В процесі встановлення поляризації, з часом, в залежності від структури діелектрика, струм абсорбції спадає до нуля, і в діелектрику протікає лише наскрізний струм.

На рис. 4.2 показано зміну в часі повного струму у діелектрику після його підключення до джерела постійної напруги.

Густина струму зміщення визначається швидкістю зміни вектору електричного зміщення (індукції) D :

$$\mathbf{J}_{см} = d\mathbf{D}/dt = \mathbf{J}_{аб}. \quad (4.4)$$

Поляризаційні струми (абсорбційні струми) необхідно брати до уваги при вимірах провідності діелектриків: при невеликій у часі витримці зразка діелектрика під постійною напругою зазвичай реєструється не тільки струм витоку, а струм абсорбції: загальний струм дорівнює сумі струму витоку та струму абсорбції (4.5).

$$\mathbf{j} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \gamma \mathbf{E} \quad (4.5)$$

За малих значень часу домінуючим є струм, обумовлений поляризаційними процесами. Як наслідок цього – хибне уявлення про значну електропровідність діелектрика. Витримка у часі під постійною напругою для забезпечення фіксації саме струму витоку, в залежності від типу та стану діелектрика, повинна становити від 1 хв. до 10 хв. у разі композитних неоднорідних діелектриків.

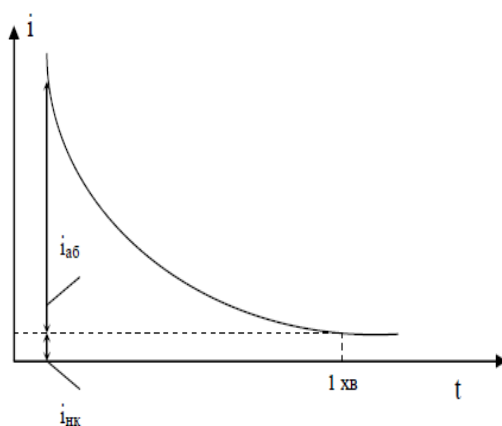


Рисунок 4.2 – Залежність струму в діелектрику при підключенні до джерела постійної напруги

Таким чином, провідність діелектрика при постійній напрузі визначається за струмом витоку, який супроводжується виділенням та нейтралізацією вільних зарядів на електродах. При змінній напрузі активна провідність визначається не тільки струмом витоку, а й активними складовими поляризаційних струмів.

4.3.2. Кількісні параметри електропровідності

Електропровідність, як фізичне явище, можна охарактеризувати кількісними параметрами.

Кількісною мірою електропровідності є питома провідність γ : дорівнює заряду, що протікає в одиницю часу через одиничний переріз зразка при одиничній напруженості електричного поля.

Електропровідність діелектриків різко відрізняється за своєю фізичною сутністю від електропровідності провідників.

Електропровідність діелектриків залежить від таких факторів, як хімічний склад і будова, тип і концентрація дефектів і іоногенних домішок, інтенсивності впливу зовнішніх іонізуючих випромінювань, напруженості електричного поля, температури, вологості й інших фізичних факторів. Електропровідність діелектрика обумовлена рухом вільних зарядів під дією прикладеного електричного поля. У якості носіїв заряду можуть виступати наступні види заряджених часток – електрони, іони й колоїдні частки. Відповідно до цього розрізняють іонну, електронну й електрофоретичну провідність.

У слабких електричних полях у газоподібних діелектриках реалізується електронна й іонна провідність, у твердих діелектриках – іонна провідність; у рідких діелектриках – іонна й електрофоретична провідність.

Незважаючи на те, що рухливість електронів у діелектриках більш ніж у 1000 разів вища, ніж рухливість іонів, електропровідність у діелектриках носить іонний характер, оскільки для утворення вільних іонів (наприклад, при дисоціації іоногенної домішки) потрібна істотно менша енергія, ніж утворення вільних електронів. Наприклад, в кристалі NaCl для переходу електрона з валентної зони в зону провідності потрібна енергія $\Delta W = 6$ еВ, а для відриву іона Na^+ з ґратки NaCl необхідна енергія, що дорівнює енергії дисоціації $W_{\text{дис}} = 0,85$ еВ. Тому в діелектриках через істотно більш високу концентрацію вільних іонів (а не електронів) іонна електропровідність є домінуючою, визначальною. З підвищенням температури концентрація вільних іонів зростає експоненційно:

$$n = n_0 \exp\left(-W_{\text{дис}}/kT\right) \quad , \quad (4.6)$$

де n_0 – число іонів в 1 м^3 при $T \rightarrow \infty$; $W_{\text{дис}}$ – енергія дисоціації, еВ; kT – теплова енергія (k – постійна Больцмана ($k = 8,617 \cdot 10^{-5}$ еВ/К; T – температура, К).

Рухливість u іонів в діелектрику зі збільшенням температури експоненційно зростає. Пояснюється це тим, що відповідно до «стрибкового» механізму електропровідності дрейфова рухливість іонів здійснюється шляхом їх стрибків з пастки на пастку, розділених потенційним бар'єром $W_{стр}$. Пастками називають області локалізації вільних носіїв заряду, якими можуть бути як електрично заряджені, так і нейтральні дефекти. "Прилипаючи" до пасток, носії заряду знаходяться на них тим довше, ніж вище потенційний бар'єр $W_{стр}$. Тому транспорт носіїв заряду здійснюється з дрібних пасток, тобто, по пастках з низькими значеннями $W_{стр}$. Імовірність теплових перескоків носіїв заряду (наприклад, іонів) з пастки на пастку пропорційна $\exp(W_{стр}/kT)$. Отже, зі збільшенням температури рухливість вільних іонів зростає експоненційно:

$$u = u_0 \exp(-W_{стр}/kT) \quad (4.7)$$

де u_0 – найбільша рухливість іона.

Рухливість іонів залежить від їх розміру та величини заряду: чим менше розмір та величина заряду іона, тим вища його рухливість.

З урахуванням (4.6) та (4.7) формулу для питомої провідності (4.3) запишемо у вигляді

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(\frac{U_{акт}}{kT}\right). \quad (4.8)$$

де $\gamma_0 = A$ – постійна, яка об'єднує n_0 та u_0 ,

$U_{акт} = W_{дис} + W_{стр}$ – енергія, необхідна для утворення та дрейфу іона (енергія активації).

Зі збільшенням температури питома електропровідність зростає (рис. 4.3) внаслідок збільшення як концентрації n , і рухливості u вільних іонів. При цьому у разі рідких діелектриків домінуючим є збільшення рухливості вільних іонів, а у разі твердих діелектриків - збільшення концентрації n вільних іонів. З рис. 4.3 також видно, що електропровідність полярних діелектриків більша, ніж неполярних, і при нагріванні зростає інтенсивніше.

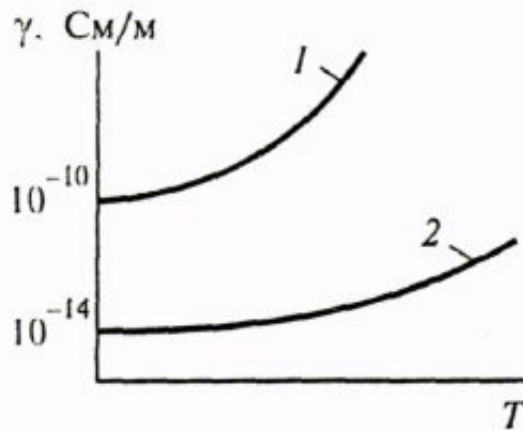


Рисунок 4.3 – Температурна залежність питомої провідності полярних (крива 1) та неполярних (крива 2) діелектриків

За високих температур можливе також впровадження електронів у твердий діелектрик з поверхні металевих електродів.

У слабких електричних полях внесок електронної провідності є дуже незначним. Однак у сильних електричних полях внаслідок звільнення зв'язаних електронів рухливість u носіїв зростає. В результаті ударної іонізації різко збільшується концентрація електронів у зоні провідності або дірок у валентній зоні. Усе це призводить до зростання електронної провідності. Залежність електропровідності від напруженості електричного поля E у такому разі описується формулою:

$$\gamma = \gamma_s e^{bE}, \quad (4.8)$$

де γ_s – питома провідність у кінці області насичення, b – залежний від температури коефіцієнт.

На практиці для оцінки електропровідних властивостей діелектриків застосовують питомий опір ρ .

Ідеальний діелектрик має нескінченно великий електричний опір і не пропускає електричний струм. Однак реальні діелектрики, які використовуються в техніці, мають кінцеву електропровідність. Їх питомий опір великий і перебуває у діапазоні $(10^6 - 10^{17})$ Ом·м.

У твердих діелектриках є два шляхи протікання електричного струму: крізь діелектрик і по його поверхні (рис. 4.4).

При прикладанні до зразка твердого діелектрика постійної напруги через нього протікає струм наскрізної провідності (струм витоку) I , який складається із двох складових: струму об'ємної провідності I_v і струму поверхневої провідності I_s : $I = I_v + I_s$ (рис. 4.4).

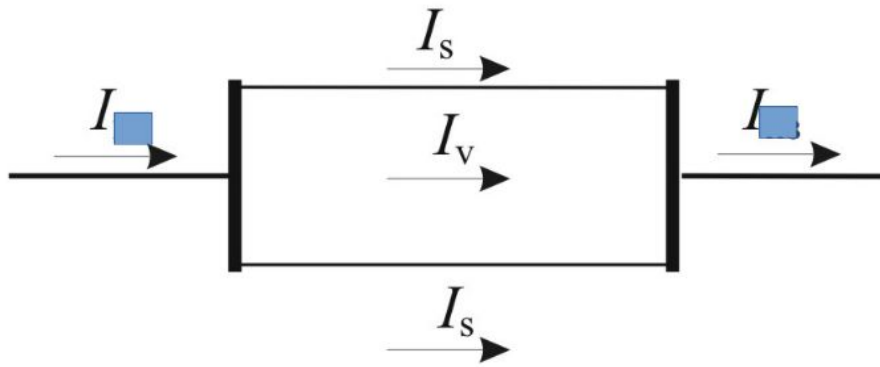


Рисунок 4.4 – Протікання струмів об'ємної I_v та поверхневої I_s провідності у твердому діелектрику при підключенні до джерела постійної напруги

Протікання струмів об'ємної провідності I_v і поверхневої провідності обумовлено об'ємною G_v та поверхневою G_s провідністю твердого діелектрика:

$$I_v = UG_v = \frac{U}{R_v}, \quad I_s = UG_s = \frac{U}{R_s} \quad (4.9)$$

де U – прикладена постійна напруга,
 R_v – об'ємний та R_s – поверхневий опори ізоляції твердого діелектрика.

Загальний опір ізоляції твердого діелектрика визначається на підставі:

$$R_{із} = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}. \quad (4.10)$$

Для оцінки здатності твердих діелектриків проводити електричний струм використовуються поняття об'ємного і поверхневого опорів.

Питомий об'ємний електричний опір ρ_v характеризує властивості діелектрика і визначається як опір куба з ребром в 1 м (подумки виділеного з досліджуваного матеріалу) при протіканні струму через дві протилежні грані куба

$$\rho_v = \frac{R_v S}{h}, \quad \text{Ом}\cdot\text{м} \quad (4.9)$$

де R_v – об'ємний опір зразка, Ом; S – площа вимірювального електрода, м^2 ;
 h – товщина зразка, м.

Питомий поверхневий електричний опір ρ_s характеризує поверхневі властивості діелектрика і залежить від природи діелектрика, якості і стану його поверхні (наявності вологи і забруднень на ній). Визначається як опір квадрата (подумки виділеного на поверхні досліджуваного матеріалу), якщо струм протікає через дві протилежні сторони цього квадрата.

Для визначення поверхневого питомого опору ρ_s плоского зразка на поверхні діелектрика поміщаються два електроди з правильними прямими кромками довжиною b , що знаходяться на відстані a один від одного (рис. 4.9, *a*). Опір R_s ділянки поверхні між електродами дорівнює

$$R_s = \rho_s \frac{a}{b}, \text{ Ом} \quad (4.10)$$

отже

$$\rho_s = R_s \frac{b}{a}, \text{ Ом.} \quad (4.11)$$

За умови $b = a$, формула (4.11) дає $\rho_s = R_s$, тобто, можна сказати, що ρ_s – опір квадрата будь-якої величини на поверхні діелектрика, якщо струм йде від однієї сторони квадрата до протилежної сторони.

Для більш точного визначення величини ρ_s може бути виміряно поверхневий опір R_s між поміщеними на поверхні діелектрика електродами у вигляді двох коаксіальних кілець (рис. 4.5, *б*).

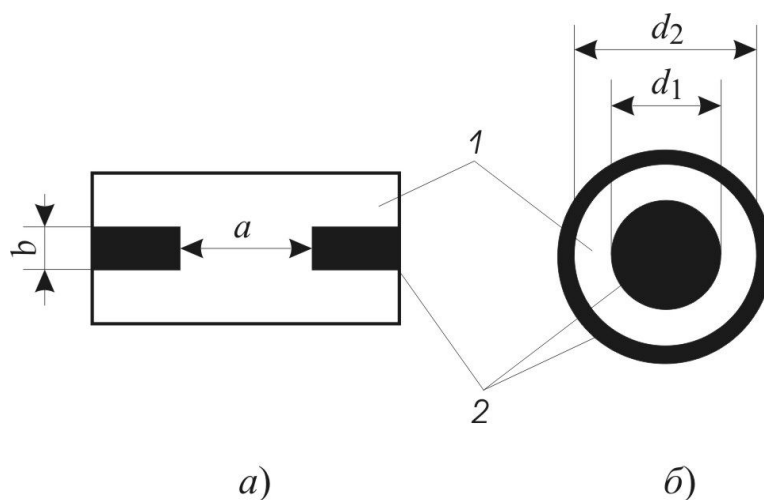


Рисунок 4.5 – Розташування електродів на поверхні діелектрика щодо поверхневого опору

a) – для електродів прямокутної форми; *б*) – для круглих електродів;
1 – діелектрик; 2 – електроди

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (4.12)$$

де d_1 – діаметр внутрішнього електроду, d_2 – внутрішній діаметр кільцевого електроду.

4. 4. Метод вимірювання опорів діелектриків

Для визначення об'ємного та поверхневого опорів діелектриків, що не перевищують ($10^9 - 10^{13}$) Ом, застосовується метод безпосереднього відхилення, метод порівняння, метод заряду конденсатора (з більшою похибкою) з використанням таких вимірювальних приладів як мегаомметри, тераомметри.

Для визначення опорів діелектриків величин порядку 10^{17} Ом використовуються електростатичні електрометри і електростатичні підсилювачі.

4.5. Опис приладів для експериментальних вимірів питомих опорів ρ_s і ρ_v твердих діелектриків.

Особливістю вимірювання питомих опорів ρ_s і ρ_v є використання триелектродної системи електродів (рис. 4.6, а) на відміну від звичайної двоелектродної схеми вимірювання питомого опору провідників. Це пов'язано з тим, що необхідно виключити вплив на результати вимірів поверхневих струмів або об'ємних струмів при вимірюваннях ρ_v та ρ_s відповідно.

Застосовуються: високовольтний (верхній) електрод, заземлювальний електрод та охоронне кільце – третій електрод.

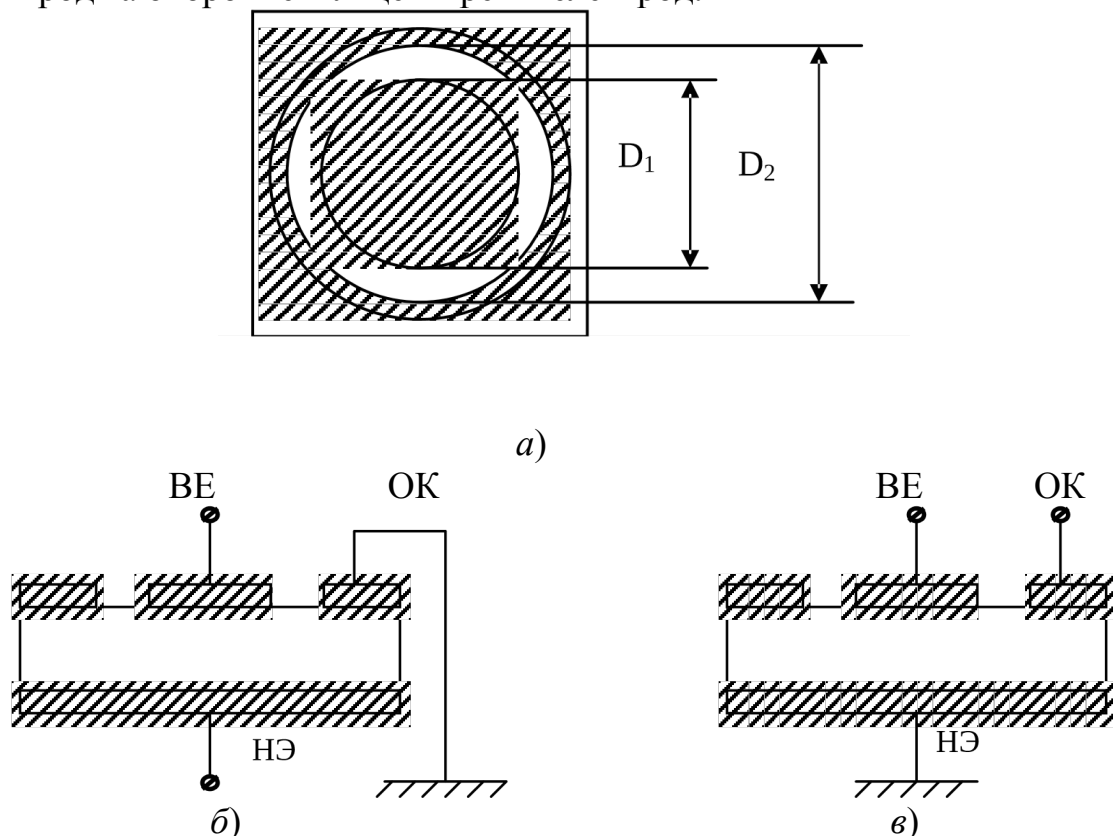


Рисунок 4.6 – Система трьох електродів та схема підключення при вимірюваннях питомих опорів діелектриків

Для цього при вимірі ρ_v заземлюється охоронне кільце – третій електрод (рис 4.6, б). В результаті поверхневі струми між охоронним кільцем і верхнім електродом йдуть у землю і не впливають на величину струму, що вимірюється, в об'ємі між верхнім і нижнім електродами.

При вимірі ρ_s заземлюється нижній електрод (рис. 4.6, в) і об'ємні струми не впливають на результат вимірювання струму, що протікає по поверхні, між охоронним кільцем і верхнім електродом.

Вимірювання питомого опору експериментальних зразків проводиться з використанням тераомметра Е6-13А (рис. 4.7) та вимірювальної комірочки, що складається з системи трьох електродів (розташована ліворуч на рис. 4.7). Тераомметр Е6-13А призначений для вимірювання опору на постійному струму в діапазоні від 10 до 10^{14} Ом.



Рисунок 4.7 – Тераомметр Е6-13А з вимірювальною коміркою

Конструктивно прилад виконаний у вигляді переносного настільного блоку в уніфікованому корпусі. На передній панелі приладу (рис. 4.8) розташовані: ручка перемикача під-діапазонів; ручка точної установки нуля УСТ.0 Точно; вимикач та індикаторна лампочка живлення МЕРЕЖА ВКЛ.; вхідні гнізда; кнопка замикача входу УСТ.0; індикаторна лампочка включення вимірювальної напруги 10 В, позначена $\times 0,1 [10V]$ (для обернено пропорційних шкал). Прилад має циферблат з чотирма шкалами.

На задній панелі приладу (рис. 4.9) розташовані: перемикач вимірювальної напруги 10V, 100V; ручка грубої установки нуля УСТ.0 ГРУБО; гніздо тримачів запобіжників; клема заземлення; гніздо виходу перетворювача ВИХІД СИМЕТРИЧНИЙ НА САМОПИСЕЦЬ. На бічній стінці приладу розміщені резистори налаштування приладу за основною похибкою. Доступ до резисторів здійснюється при знятих кришках кожуха. Вхідна лампа поміщена в металевий екран і встановлена на платі підсилювача. Екран перебуває під захисним потенціалом.

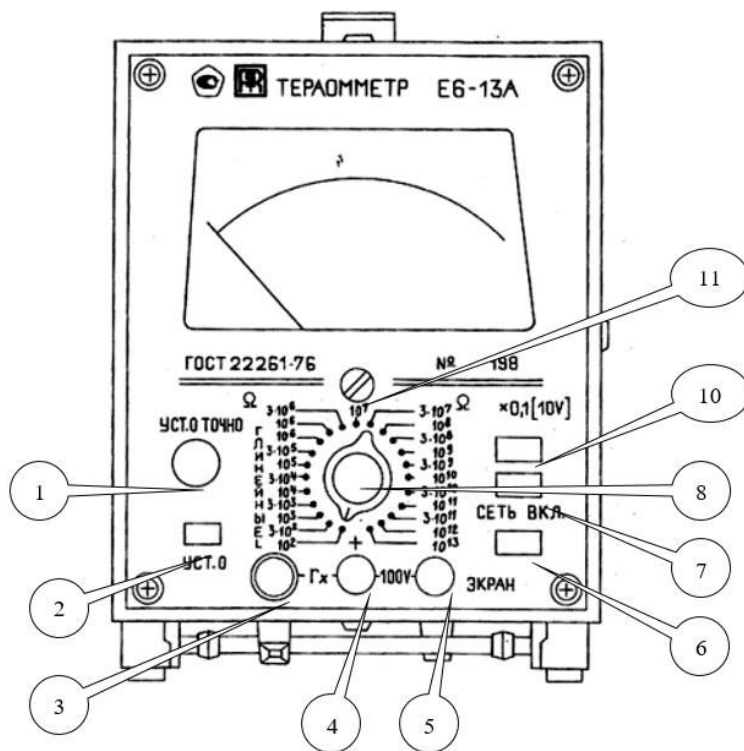


Рисунок 4.8 – Вид приладу зі сторони передньої панелі

1 – ручка установки нуля "точно"; 2 – кнопка замикача входу; 3 – високоомне вхідне гніздо; 4 – вхідне гніздо; 5 – клемма для підключення екрана; 6 – вимикач живлення; 7 – індикатор увімкнення приладу; 8 – перемикач під-діапазонів вимірювання; 9 – коректор механічного нуля; 10 – індикатор увімкнення вимірювальної напруги 10V (для зворотної шкали); 11 – встановлення нуля «грубо»

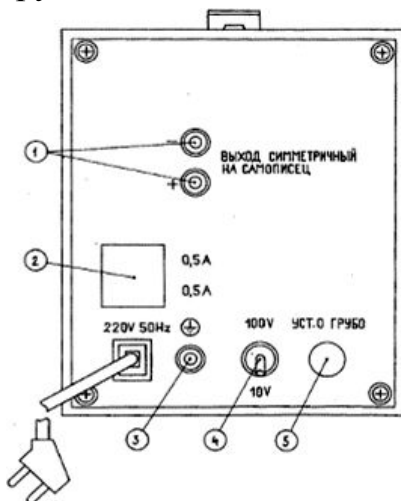


Рисунок 4.9 – Вигляд задньої панелі приладу

1 – гнізда виходу перетворювача; 2 – вставки плавкі; 3 – клемма заземлення корпусу приладу; 4 – перемикач вимірювального напруження; 5 – ручка установки нуля «УСТ.0 ГРУБО»

Діапазон вимірюваних опорів під час використання лінійної шкали від 10 до 10^6 Ом перекривається під-діапазонами з верхніми межами: 10^2 ; $3 \cdot 10^2$; 10^3 ; $3 \cdot 10^3$; 10^4 ; $3 \cdot 10^4$; 10^5 ; $3 \cdot 10^5$ та 10^6 Ом. Діапазон вимірюваних опорів при використанні назад пропорційних шкал від 10^6 до 10^{14} Ом з під-діапазонами з нижніми межами: 10^6 ; $3 \cdot 10^6$; 10^7 ; $3 \cdot 10^7$; 10^8 ; $3 \cdot 10^8$; 10^9 ; $3 \cdot 10^9$; 10^{10} ; $3 \cdot 10^{10}$; 10^{11} ; $3 \cdot 10^{11}$; 10^{12} та 10^{13} Ом. При цьому падіння напруги на об'єкті, що вимірюється при виконанні лінійної шкали є функцією показання приладу, тобто. залежить від опору об'єкта і може змінюватися від 0 до 10 В. При використанні обернено пропорційної шкали напруга на об'єкті, що вимірюється, постійна і дорівнює 100 В або 10 В залежно від положення перемикача вимірюваної напруги. Основна похибка приладу при вимірі з лінійною шкалою, виражена у відсотках від кінцевого значення встановленого під-діапазону виміру, що не перевищує $\pm 2,5\%$.

Основна похибка приладу при вимірі зі зворотно пропорційної шкалою, виражена у відсотках від довжини робочої частини шкали, не перевищує: $\pm 2,5\%$ – на під-діапазонах від 10^6 до 10^8 Ом; $\pm 4,0\%$ - на під-діапазонах від $3 \cdot 10^8$ до 10^{11} Ом; $\pm 6,0\%$ - на під-діапазонах від $3 \cdot 10^{11}$ до 10^{12} Ом; $\pm 10,0\%$ – на під-діапазоні 10^{13} Ом. Варіація показань приладу збирається у $\pm 1,0\%$.

Перед початком вимірювань електроди на зразку повинні бути замкнуті не менше 1 хв до подачі вимірювальної напруги. **Рекомендовані значення напруги вимірювання опору діелектричних матеріалів – 50, 100, 250, 500, 1000 В.** Відлік виміру повинен проводитися не раніше 60 -ї секунди після прикладання постійної напруги. При повторенні вимірювання вимірюваний зразок необхідно деполяризувати. Деполяризацію здійснюють шляхом заземлення електродів через вимірювальний пристрій.

4.6. Методика виконання лабораторної роботи

1. Отримати у викладача зразки діелектричних матеріалів.
2. Заміряти за допомогою мікрометра та штангенциркуля розміри зразків – довжину, ширину, товщину. Занести дані за зразками до звіту.
3. Увімкнути у мережу тераомметр.
4. Зібрати вимірювальну установку, з'єднавши проводом клема заземлення на тераометрі та на задній стінці вимірювальної комірки.
5. З'єднати екранні гнізда на передній панелі тераомметра з екранним дротом від вимірювальної комірки, вибравши положення **X V**.
6. Перевести вимикач живлення у положення МЕРЕЖА. При цьому повинна світитись індикаторна лампочка. Протягом 1 хв показчик приладу встановиться на нульову позначку шкали. Тривалість часу встановлення робочого режиму 30 хв. після увімкнення приладу.
7. Встановити ручками УСТ.0. ГРУБО та УСТ.0. ТОЧНО показчик приладу на нульову позначку шкали, а перемикач під-діапазонів перевести у положення, що відповідає вимірюваному опору. На під-діапазонах від 10^2

до 10^6 Ом, позначених на передній панелі ЛНІЙНІ, відлік робіть за лінійними шкалами (дві нижніх) шкали, що наростають зліва направо), а на піддіапазонах від 10^6 до 10^{13} Ом – по обернено пропорційним шкалам (дві верхніх, значення наростають справа наліво). При проведенні вимірів по обернено пропорційним шкалам вимірювальна напруга на вхідних клеммах може бути обрана рівною 100 або 10 В за допомогою перемикача, розташованого на задній панелі приладів. При включенні вимірювальної напруги 10 на передній панелі приладу світиться індикаторна лампочка $\times 0,1[10V]$. Це означає, що отриманий за приладом результат виміру слід помножити на 0,1. Наприклад, при положенні перемикача під-діапазонів 10^{10} Ом, перемикача вимірювального напруги 10V, покажчика приладу на відмітці 2 результат вимірювання дорівнює $2 \cdot 10^{10} \times 0,1 = 2 \cdot 10^9$ Ом. Увага! Множник $\times 0,1$ дійсний тільки для під-діапазонів від 10^6 до 10^{13} Ом.

8. Проведення вимірювань у діапазоні від 10^2 до 10^6 Ом (по лінійним шкалам): встановити перемикач під-діапазонів у положення, відповідне вимірюваному опору; підключити вимірюваний об'єкт до клем r_x приладу; встановити ручкою УСТ.0. ТОЧНО покажчик приладу на нульову позначку шкали; переведіть ручку замикача входу в положення ВИМІР., злегка натиснувши, повернути її проти годинникової стрілки до упору і відпустити зробити відлік за лінійною шкалою, що відповідає встановленому під-діапазону, після чого перевести ручку замикача входу в положення УСТ.0. Тільки після цього вимкнути вимірюваний об'єкт.

9. Проведення вимірів у діапазоні від 10^6 до 10^{14} Ом (по зворотному пропорційним шкалам): встановити перемикач під-діапазонів у положення, що відповідне вимірюваному опору, попередньо включивши необхідну вимірювальну напругу перемикачем 100V, 10V; підключити вимірюваний об'єкт до клем r_x приладу; встановити ручкою УСТ.0. ТОЧНО покажчик приладу на позначку ∞ обернено пропорційних шкал; перевести ручку замикача входу в положення ВИМІР. І провести відлік за шкалою, що відповідає встановленому під-діпазону. При проведенні вимірювань із вимірювальною напругою 10V керуйтеся другою частиною пункту 6; перевести ручку замикача входу в положення УСТ.0 і виключити об'єкт, що вимірювався.

10. Помістити об'єкт вимірювань на нижній електрод комірки.

11. Накрити об'єкт другим електродом. Встановити зверху притиск.

12. Провести вимірювання для всіх зразків матеріалів, відповідно до пункту 7 або 8.

13. Після закінчення роботи знеструмити тераомметр і розібрати вимірювальну схему.

14. Після вимикання стенду за допомогою лінійки або штанг-циркуля - виміряти діаметр вимірювальних електродів, зазор між вимірювальним та охоронним електродами.

15. Провести за наведеними раніше формулами розрахунок значень **X**

V для кожного з одержаних зразків діелектриків.

16. Провести за наведеними раніше формулами розрахунок значень χ S для кожного з одержаних зразків діелектриків для трьох значень постійної напруги: 250 В, 500 В та 1000 В.

17. Результати обчислень для кожного із значень прикладеної напруги занести до таблиці.

Діелектрик	Товщина, м	R_v , Ом	$R_{v_{сеп}}$, Ом	ρ_v , Ом*м	R_s , Ом	$R_{s_{сеп}}$, Ом	ρ_s , Ом
Папір офісний							
Папір конденса- торний марки КОН-1							
Кремнійорганічна гума							
Поліефірефіркетон (РЕЕК)							

За результатами проведених обчислень:

1. порівняти визначені значення питомих опорів діелектриків для трьох значень прикладеної напруги;

2. порівняти визначені значення питомих опорів, за винятком офісного паперу, із значеннями, наведеними у довіднику для матеріалу діелектрика зразка. Значення ρ_v та ρ_s мають бути близькими у межах точності вимірювань.

18. Оформити звіт, зробити висновки про виконану роботу.

4.7.Контрольні питання

1. Що являє собою густина струму?
2. Який фізичний сенс має питома провідність?
3. Якою є необхідна умова виникнення електричної провідності у речовинах?
4. Валентні електрони в кристалі належать кожен своєму атому або всьому кристалу?
5. Яка різниця між провідниками, напівпровідниками й діелектриками з точки зору зонної теорії?

6. Чому діелектрики мають ненульову електропровідність?
7. Які види електропровідності можливі в твердих діелектриках?
8. Що називається електропровідністю?
9. Якими параметрами характеризують діелектрики з точки зору їх електропровідності?
10. Як змінюється рухливість іонів в діелектрику зі збільшенням температури?
11. Що являє собою енергія активації?
12. Чим пояснюється зростання рухливості носіїв заряду у сильних електричних полях?
13. Які струми можуть протікати у діелектрику?
14. Чим визначається електропровідність при постійній напрузі?
15. В чому полягає різниця у струмі витоку та струмі абсорбції?
16. За якої напруги (постійної чи змінної) необхідно вимірювати опір діелектриків і чому?
17. Чому відлік струму через зразок діелектрика слід провадити через 1 хв. після включення напруги?
18. Чому дорівнює опір твердого діелектрика?
19. Що таке ρ_v і ρ_s і які одиниці їх виміру в системі СІ?
20. Від яких чинників залежить величина питомого об'ємного опору діелектриків?
21. Яка особливість схеми вимірювання ρ_v і ρ_s твердих діелектриків?
22. Чим обумовлено необхідність проведення вимірювань при різних значеннях напруги?
23. Чим пояснити різницю в значеннях питомого опору полярних і неполярних діелектриків за результатами досліджень?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

5.1. Мета та завдання роботи

Метою роботи є:

дослідження електричної міцності твердих діелектриків від складу, будови та товщини плоских діелектричних зразків в однорідному та неоднорідному електричному полі.

Завданням роботи є вивчення методів вимірювання товщини зразків діелектриків, пробивної напруги та визначення електричної міцності (пробивної напруженості) твердих діелектриків.

5.2. Підготовка до роботи.

У процесі підготовки до роботи до її виконання необхідно:

1. засвоїти мету та завдання роботи: ознайомитись з експериментальними зразками діелектриків; підготувати зразки для випробування з кабельного та конденсаторного паперу; виміряти товщину кожного зразка мікрометром у п'яти місцях; розрахувати середнє значення товщини;

2. ознайомитися з основними теоретичними положеннями з пробою твердих діелектриків;

3. розібратися у схемі вимірів, визначити, які прилади використовують у роботі, які функціональні можливості приладу щодо отримання однорідного та неоднорідного електричного поля; у який спосіб забезпечується індикація вимірюваних значень товщини та пробивної напруги; вимоги до зразків діелектриків відповідно до технічних можливостей застосованого устаткування;

4. вивчити методику виконання, підготувати таблиці вимірювань із занесеними даними щодо експериментальних зразків діелектриків для подальшого заповнення результатами вимірювань.

5.3. Теоретичні положення до роботи

Однією з найважливіших характеристик діелектриків є напруга пробою. Це мінімальна прикладена напруга до діелектрика, що призводить до утворення в ньому провідного каналу. За напругу пробою приймають таку напругу, за якої $dI/dU \rightarrow \infty$: диференційна провідність матеріалу стає нескінченно великою (рис. 5.1).

Механізм пробою твердого діелектрика полягає в розриві хімічних зв'язків у речовині під дією зовнішнього електричного поля, що призводить

до руйнування діелектрика з втратою ним електроізоляційних властивостей. Це говорить про взаємозв'язок між електричною міцністю твердого діелектрика та енергією його хімічних зв'язків. Так, для ковалентного зв'язку між двома атомами водню енергія зв'язку становить 435 кДж/моль; іонний зв'язок характеризується значеннями енергії від 10 до 1000 кДж/моль; міжмолекулярний (Ван-дер-Ваальсовий) - на рівні від 0,1 до 10 кДж/моль.

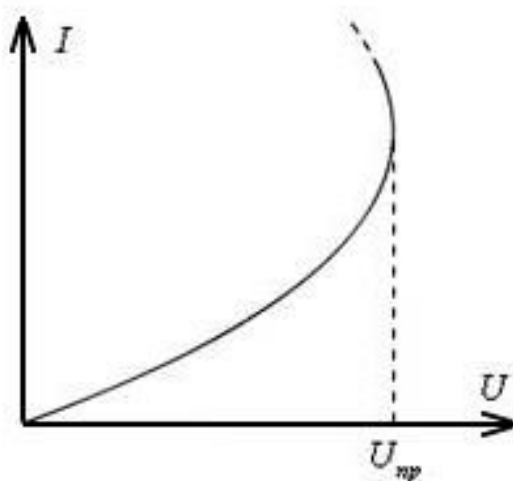


Рисунок 5.1 – Типова вольт-амперна характеристика твердого діелектрика при прикладанні напруги

Пробій – явище утворення в діелектрику провідникового каналу під дією електричного поля та процес переходу від стану з низькою електропровідністю до стану з високою електропровідністю. Процес протікання стаціонарного струму в діелектрику до чи після пробою називається розрядом. Різниця в електропровідності діелектрика до пробою і провідникового каналу, що утворився в діелектрику внаслідок пробою, може складати до 10^{15} разів. Електропровідність діелектриків за визначенням менше 10^{-8} См·м⁻¹, а провідників близько 10^7 См·м⁻¹. Теплова швидкість носіїв заряду при кімнатній температурі для іонів має величину порядку 10^3 м/с, для електронів - 10^5 м/с, а максимально досяжна швидкість $3 \cdot 10^8$ м/с. З формули для питомої електричної провідності (див. формулу 4.3 до лабораторної роботи 4): $\gamma = qn\mu$ стає зрозумілим, що забезпечити таке її зростання можна тільки за рахунок збільшення концентрації вільних носіїв заряду.

Значення напруги пробою $U_{пр}$ залежить від різних параметрів та факторів: товщини діелектрика h ; форми електричного поля, обумовленої конфігурацією електродів і самого діелектрика; температури діелектрика. Відповідно, $U_{пр}$ характеризує не тільки властивості самого діелектрика, як здатність конкретного діелектрика протистояти сильному електричному полю.

Для порівняння властивостей діелектриків зручною характеристикою є електрична міцність E_{np} .

Мінімальна напруга, за якої відбувається пробій діелектрика, називається пробивною напругою, а мінімальна напруженість однорідного електричного поля при пробіі – електричною міцністю діелектрика.

Таке визначення робить електричну міцність однозначною характеристикою діелектрика, в той час як пробивна напруга характеризує електроізоляційну конструкцію. Зв'язок між ними в однорідному полі описується звичайною формулою:

$$E_{np} = U_{np}/h, \quad (5.1)$$

де h – товщина діелектрика.

Типовий вигляд залежності електричної міцності твердого діелектрика від товщини представлено на рис. 5.2.

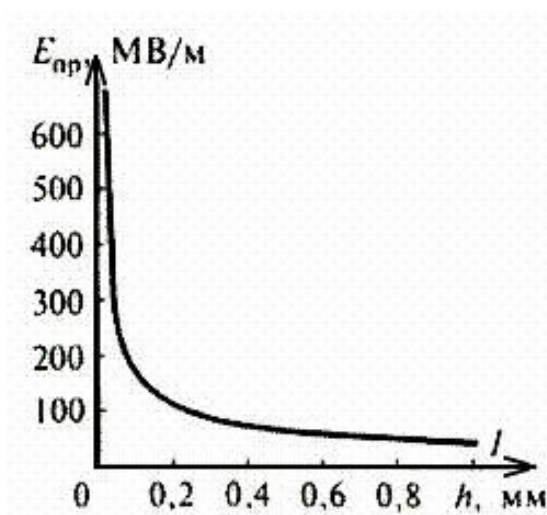


Рисунок 5.2 – Залежність електричної міцності твердого діелектрика від товщини матеріалу

Найчастіше напруга пробою зі збільшенням товщини діелектрика зростає повільніше, ніж за лінійним законом. При цьому в тонких шарах діелектрика значний вплив надають неоднорідності структури, зменшуючи електричну міцність U неоднорідних тонких матеріалів (папір, лако-тканина, тощо) електрична міцність зменшується зі збільшенням площі електродів, що пояснюється збільшенням вірогідності знаходження дефектів структури таких діелектриків.

Розрізняють наступні види пробою відповідно до рекомендацій МЕК (Міжнародної електротехнічної комісії): електричний; тепловий; поверхневий; іонізаційний; електрохімічний; електромеханічний.

Пробій – це порогове явище: для того, щоб він відбувся, напруга U повинна перевищувати певне порогове значення.

Електричний пробій твердих діелектриків характеризується дуже швидким розвитком. Він протікає за час не більше ($10^{-7} - 10^{-8}$) с, характерний для макроскопічне однорідних діелектриків з малими діелектричними втратами. Супроводжується у своїй початковій стадії руйнуванням діелектрика у дуже вузькому каналі. Електричний пробій за своєю природою є суто електронним процесом, коли з небагатьох початкових електронів у твердому тілі створюється електронна лавина. Розвиток лавин супроводжується фотоіонізацією (як в газах), яка прискорює утворення каналу, що проводить. Прискорені електричним полем електрони при зіткненнях передають свою енергію вузлам ґратки і розігрівають її до плавлення. У розрядному каналі створюється значний тиск, який може призвести до появи тріщин або повного руйнування діелектрика. Чисто електричний пробій має місце, коли виключено вплив електропровідності та діелектричних втрат, що обумовлюють нагрівання матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. Такі умови вдається спостерігати для монокристалів лужно-галоїдних з'єднань і деяких органічних полімерів. В цьому випадку $E_{пр}$ досягає більше 10^7 МВ/м. При цьому виді пробою величина електричної міцності в однорідному електричному полі від товщини не залежить і трохи знижується при підвищенні температури

У неоднорідних електричних полях пробивна напруга однорідного діелектрика менше, ніж у однорідних.

Електрична міцність твердих діелектриків практично не залежить від температури до деякого її критичного значення, коли спостерігається помітне зниження електричної міцності.

На рис.5.3 представлена залежність електричної міцності від температури діелектрика при електричному та тепловому пробіі.

Тепловий пробій виникає у тому випадку, якщо кількість теплової енергії, що виділяється в діелектрику за причини діелектричних втрат, перевищує ту кількість енергії, яка може розсіюватися в даних умовах. При цьому порушується тепла рівновага, а процес набуває лавинний характер.

Тепловий пробій є порушенням теплової рівноваги в діелектрику, наслідком якого є необмежений ріст найбільшої температури T_{\max} руйнування ізоляції. Він відбувається при нарузі $U_{пр}$, коли виконується умова

$$\frac{\partial U}{\partial T_{\max}} = 0 . \quad (5.2)$$

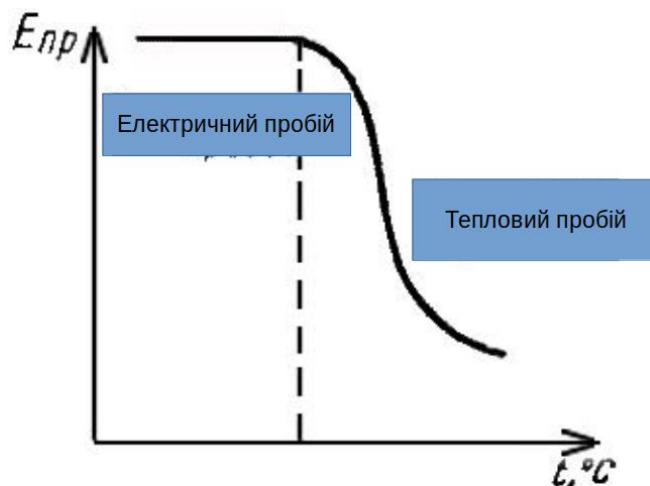


Рисунок 5.3 – Залежність електричної міцності від температури при електричному та тепловому пробію

У разі настання теплового пробію, який пов'язаний із нагріванням діелектрика в електричному полі, процес йде наступним чином. Після подачі напруги на діелектрик за причини втрат електричної енергії та перетворення у теплову, відбувається нагрів до деякої критичної температури. Зі зростанням температури зростає кількість носіїв, зростає електропровідність, діелектричні втрати зростають, спостерігається саморозігрівання діелектрика, температура підвищується ще більше. Зрештою, у діелектрику відбуваються суттєві зміни (розплавлення, обуглювання, розтріскування, тощо залежно від природи матеріалу), та його власна електрична міцність знижується настільки, що відбувається пробій. Пробій відбувається при напруженості електричного поля нижчою, ніж без розігріву, тобто якби пробій був чисто електричним.

Тепловий пробій може мати локальний характер, при якому середня температура всього об'єму діелектрика суттєво не змінюється. Таким чином, **тепловий пробій суттєво залежить від інтенсивності розсіювання тепла, що виділяється у діелектрику, в навколишнє середовище.** Електрична міцність при тепловому пробію є не тільки характеристикою матеріалу, але і визначається формою та іншими параметрами самого виробу, в протилежність електричному і іонізаційному пробію, де пробивна напруженість може служити характеристикою матеріалу з точки зору електричної міцності. Пробивна напруга, обумовлена нагрівом діелектрика, пов'язана з частотою напруги, умовами охолодження, температурою довкілля та ін. Крім того, пробивна напруга при такому виді пробію залежить від теплостійкості діелектрика. Органічні діелектрики (наприклад, поліетилен, полістирол), за інших рівних умов, мають нижчу електричну міцність при електротепловому пробію, чим

неорганічні (кварц, кераміка) внаслідок меншої теплостійкості.

Потужність, що виділяється в зразку діелектрика ємністю C та тангенсом кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, при поданні напруги U (діюче значення) з кутовою частотою ω визначається співвідношенням

$$P = U^2 \omega C \text{tg}\delta, \quad (5.3)$$

тоді як теплова потужність, що відводиться від зразка на підставі закону Ньютона

$$P_{\text{від}} = k S (T - T_0), \quad (5.4)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі, S – площа зразка, T – температура зразка, T_0 – температура довкілля.

Умова теплової рівноваги визначається рівністю потужностей, що поглинається і розсіяваною: $P_{\text{в}} = P_{\text{від}}$. При підвищенні температури $\text{tg}\delta$ зазвичай росте (рис. 5.4) (зростають діелектричні втрати на електропровідність) за експоненціальним законом:

$$\text{tg}\delta(T) = \text{tg}\delta_0 e^{a(T-T_0)}, \quad (5.5)$$

де $\text{tg}\delta_0$ – тангенс кута діелектричних втрат при заданій температурі T_0 , наприклад при $+20$ °С; a – коефіцієнт, що залежить від властивостей ізоляції; T_0 – вихідна температура навколишнього середовища.

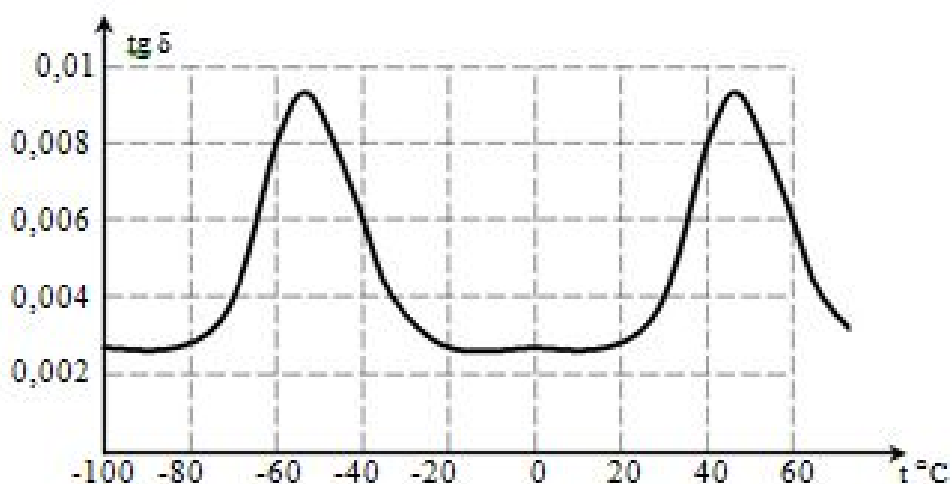


Рисунок 5.4 – Температурна залежність тангенсу кута діелектричних втрат неоднорідного діелектрику: кабельний папір, просочений масло-каніфольним компаундом

Починаючи з деякої критичної температури $T_{кр}$, значення $P_n > P_{від}$. В результаті перевищення тепловиділення над тепловіддачею діелектрик лавиноподібно розігрівається, що призводить до його руйнування (плавленню, згоранню). Згідно з умовою теплової рівноваги $P_n = P_{від}$ пробивна напруга при електротепловому пробію буде мати вищі значення у разі діелектрика більшої товщини h

$$U_{np} = \sqrt{(k S (T - T_0) / (\omega C \operatorname{tg} \delta))}, \quad (5.5)$$

де C – електрична ємність плаского зразка діелектрика з діелектричною проникністю ϵ товщини h

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / h. \quad (5.6)$$

Напруга пробію при тепловому пробію вимагає значного часу на розігрів діелектрика (рис. 5. 3).

Зі зростанням частоти електричної напруги та зростанням температури навколишнього середовища пробивна напруга зменшується. Залежність, представлєну на рис. 5.5, часто називають “кривою життя” діелектрика, так як по ній можна визначити час життя діелектрика при заданій напруженості електричного поля.

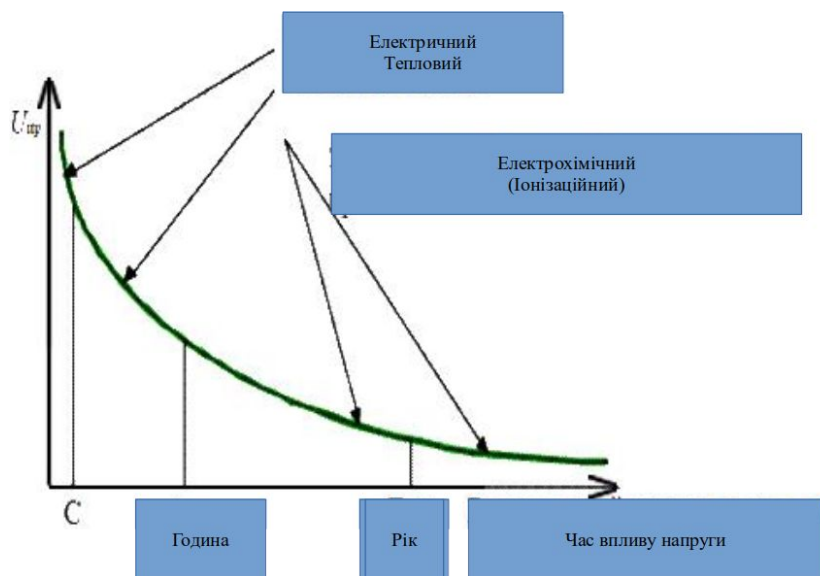


Рисунок 5.5 – “Крива життя” діелектриків

Електромеханічний пробій готується механічним руйнуванням матеріалу (утворенням макроскопічних тріщин) силами електричного поля (тиском електродів). Електрохімічний пробій пов'язаний з хімічною зміною матеріалу в електричному полі, наприклад, металізацією матеріалу в результаті електролізу. Цей вид пробію виникає при підвищених температурах та високій вологості повітря. Електрохімічний пробій може мати місце при

високих частотах, якщо в закритих порах матеріалу (наприклад, у кераміці) відбувається іонізація газу, що супроводжується тепловим ефектом, та відновленням оксидів металів змінної валентності. Розвиток електрохімічного пробою вимагає найбільшого часу з усіх розглянутих видів пробою, оскільки пов'язаний зі зміною електропровідності діелектрика в процесі його експлуатації під впливом зовнішніх факторів.

Різновидом теплового пробою можна вважати іонізаційний пробій. Він характерний для твердих пористих діелектриків та обумовлений іонізацією газу в порах. За рахунок іонізаційних втрат розігрівається поверхня закритих пір, виникають локальні перепади температури у діелектрику та пов'язані з ними термомеханічні напруження. Такі процеси особливо небезпечні в крихких матеріалах, оскільки термомеханічні напруги можуть перевершити межу міцності матеріалу і викликати розтріскування діелектрика. Іонізаційний пробій пояснюється дією на діелектрик хімічно агресивних речовин, що утворюються в газових порах діелектрика при часткових розрядах, а також ерозією діелектрика іонами газу на межі пір

Величина електричної міцності залежить від характеру електричного поля. В однорідному електричному полі $E_{пр}$ має постійне значення. Однорідне поле можна отримати: між плоскими електродами із закругленими кінцями (рис. 5.6, а); між кулями великого діаметру при малій відстані між ними (рис. 5.6, б).

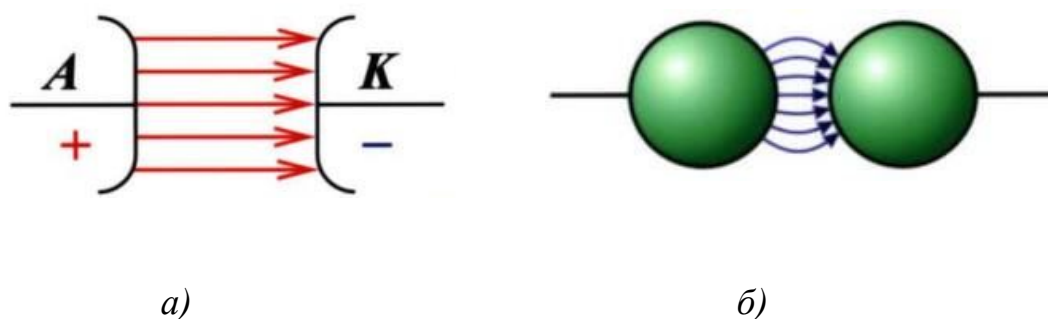


Рисунок 5.6 — Способи досягнення однорідного електричного поля

Неоднорідне електричне поле виникає між двома вістрями (рис.5.7, а), між вістрям та площиною (рис.5.7, б).



Рисунок 5.7 – Способи досягнення неоднорідного електричного поля

Мінімальну напруженість електричного поля в неоднорідному полі, що приводить до пробою, в силу її неоднозначності, краще називати **пробивною напруженістю поля**.

Слід зауважити, що в техніці високих напруг **електричною міцністю ізоляції називають максимальну випробувальну напругу, що втримується цією ізоляцією**, на відміну від електричної міцності діелектрика, що характеризується мінімальною пробивною напруженістю поля в однорідному полі.

5. 4. Метод вимірювання товщини зразків твердих тонких діелектриків та пробивної напруги

Для вимірювання товщини зразків діелектриків застосовуються методи вимірювання товщини на оптиметрі. Принцип дії оптиметра базується на сполученні оптичного та механічного важелів. Головною частиною оптиметра є вимірювальний пристрій або трубка, її оптична система складається з колінчатої авто колімаційної системи типа Аббе та дзеркала, що коливається, механічно зв'язаного з вимірювальним стержнем.

Чисельне значення вимірюваної величини напруги визначається безпосередньо по відліковому пристрою вимірювального приладу, проградуєваного в одиницях напруги – кВ. Це найбільш поширений і найбільш оперативний метод безпосередньої оцінки результатів вимірювання.

Аналіз місця та характеру пробою в однорідному та неоднорідному електричному полі твердого діелектрика виконується оптичним методом із застосуванням мікроскопу.

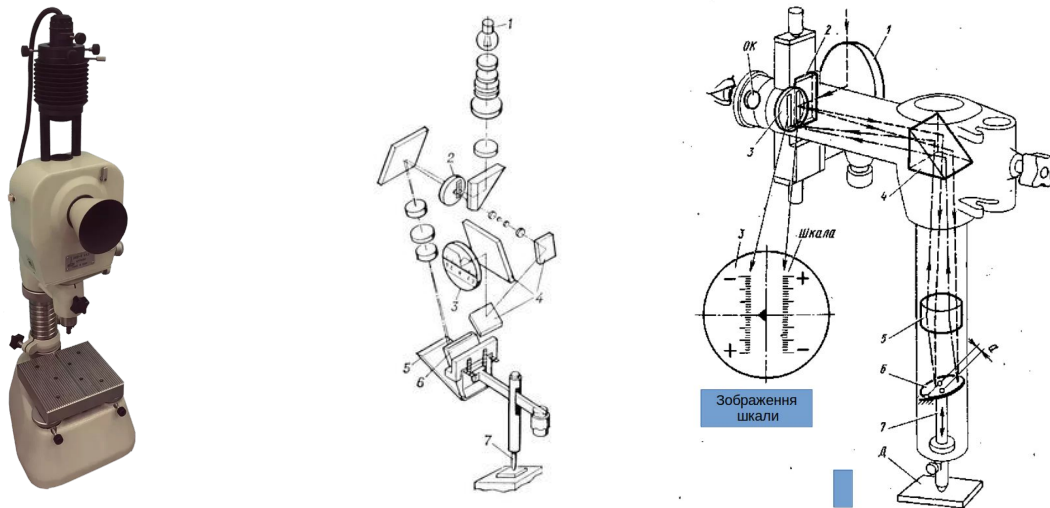
5.5. Опис приладів для експериментальних вимірів товщини та пробивної напруги твердих діелектриків.

5.5.1. Оптиметр (від грец. *optós* - видимий і метр) – прилад для вимірювання лінійних розмірів (відносним методом), перетворювальним елементом в якому служить важільно-оптичний механізм.

Технічні характеристики оптиметра ІКВ (рис. 5.7, *a*): значення межі виміру за шкалою – ± 100 мкм; ціна поділу шкали – 1,0 мкм; вимірювальне зусилля при зовнішніх вимірах – не більше 2,0 Н.

Важільною передачею є в механізмі дзеркало, що коливається, оптичним перетворювачем – автоколімаційна трубка. Оптичний перетворювач – трубка має проєкційний відлік. Трубка оптиметра має шкалу з ціною розподілу 1 мкм, межа виміру за шкалою ± 100 мкм.

На рис. 5.7, *б* показано схему оптиметра з проєкційним відліком: 1 – лампа; 2 – пластина зі шкалою та індексом; 3 - екран; 4 – дзеркала, що проєктують; 5 – нерухоме дзеркало; 6 – дзеркало, що гойдається; 7 – вимірювальний стрижень.



а) б) в)
Рисунок 5. 7 – Загальний вигляд (а) та компоненти (б, в) оптиметра

У трубці оптиметра (рис. 5.7, в) від джерела світла промені направляються дзеркалом 1 і призмою 2 на шкалу, на якій нанесено 200 поділів, кожна з котрих відповідає 1 мкм. Шкала та покажчик нанесені на площину скляної пластинки 3, розташованої у загальній фокальній площині об'єктива 5 та окуляра ОК. Штрихи шкали розташовані з різних боків щодо головної оптичної осі. Пройшовши шкалу, промінь потрапляє на призму 4 і, повернувшись на 90° , проходить через об'єktiv 5. Вийшовши з об'єктива, промінь відіб'ється від дзеркала 6 і повернеться у фокальну площину об'єктива зі змішуванням горизонтальному напрямку щодо головної оптичної осі. Горизонтальне усунення використовується для того, щоб спостерігати зображення шкали окремо від самої шкали. Зображення шкали буде зміщуватися і у вертикальному напрямку по відношенню до головної оптичної осі, так як з переміщенням вимірювального стрижня 7, що спирається на зразок діелектрика товщини h , що вимірюється, буде змінюватися нахил дзеркала 6 на кут α , що викличе відхилення відбитих від дзеркала променів. При цьому зображення шкали переміститься у вертикальному напрямку щодо нерухомого покажчика на відповідну величину. В оптиметрі використаний принцип оптичного важеля: малим плечем важеля є відстань a від точки опори дзеркала 6, що коливається, до осі вимірювального стрижня 7, великим – фокусна відстань об'єктива.

5.5.2. Лабораторний стенд по дослідженню електричної міцності твердих діелектриків на постійному струмі складається з двох пристроїв, вимірювального пристрою і високовольтного пристрою, з'єднаних між собою блокувальним 14 і вимірювальним 13 кабелями. Зовнішній вигляд

пристроїв наведено на рис. 5.8 – рис.5.11.

На передній панелі вимірювального пристрою (рис. 5.8) розташовані цифровий індикатор вихідної напруги 15, кнопка "ПУСК" 17, кнопка "СКИДАННЯ" 19, відповідні світлодіоди, що сигналізують про натискання кнопок "ПУСК" 18 і "СКИДАННЯ" 19, і світлодіод "ПРОБІЙ", що показує подію пробіть 16.

На задній панелі вимірювального пристрою (рис.5.9) розташовані гніздо блокування мережі " БЛОКУВАННЯ МЕРЕЖІ" 23, клемма захисного заземлення 21, розетка 22 для підключення сигнального кабелю 13 від високовольтного пристрою, мережевий шнур 26, мережевий вимикач 25 і два тримачі запобіжників закриті захисною кришкою 24.

Зверху на високовольтному пристрою розташована (рис. 5.10) вимірювальна головка 1 для вимірювання товщини зразка з ручкою корекції установки "0" 7 і важелем переміщення рухомого стрижня 2. Усередині високовольтного пристрою розташована вимірювальна камера, в яку введено рухомий стрижень вимірювальної головки 3. На стрижні розташовані випробувальні електроди чотирьох типорозмірів 4 і 5, які змінюються за допомогою обертання. Електроди вимірювального стрижня електрично з'єднані з корпусом (загальним проводом) високовольтного пристрою і клемою вмонтованого електрода 6, на який подається позитивний випробувальний потенціал.

Усередині вимірювальної камери розташований пристрій кріплення випробуваного зразка, який складається з прижимної планки 10 і прижимних гвинтів 9, і дві стійки з гвинтами попередньої установки "0" 8 вимірювальної головки. Вимірювальна камера (рис. 5.11) ззовні закрита прозорим захисним щитком 11, який при відкриванні блокує, за допомогою вмонтованого в вимірювальний блок кінцевого вимикача, електроживлення вимірювального пристрою (і високовольтного пристрою), що підводять до нього за допомогою блокувального кабелю 14 від гнізда " БЛОКУВАННЯ МЕРЕЖІ " 23 на вимірювальному пристрою.

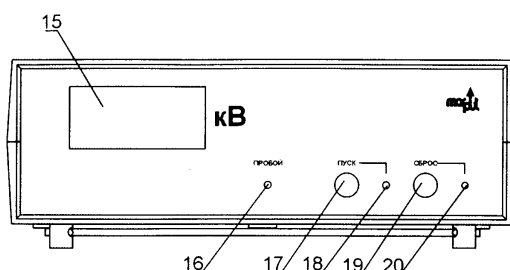


Рисунок 5.8 – Вимірювальний пристрій. Вигляд спереду

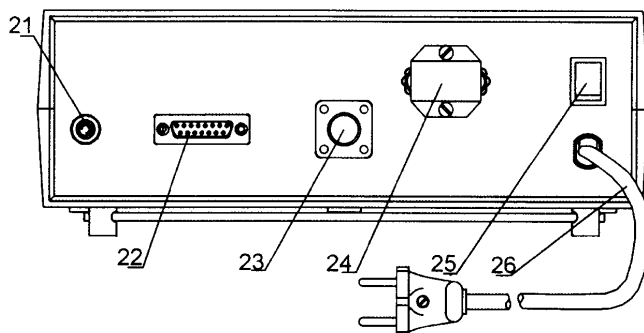
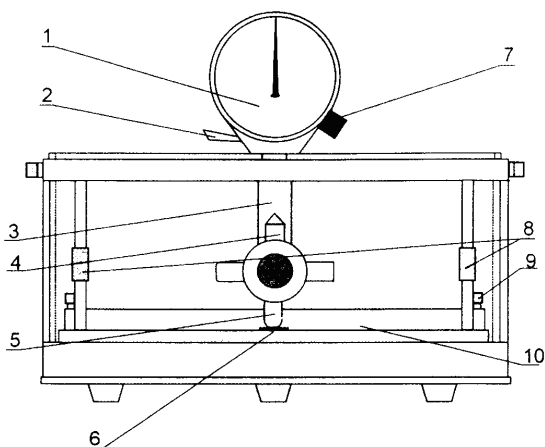


Рисунок 5.9 – Вимірювальний пристрій. Вигляд ззаду



–Рисунок 5.10 – Високовольтний пристрій. Вигляд спереду

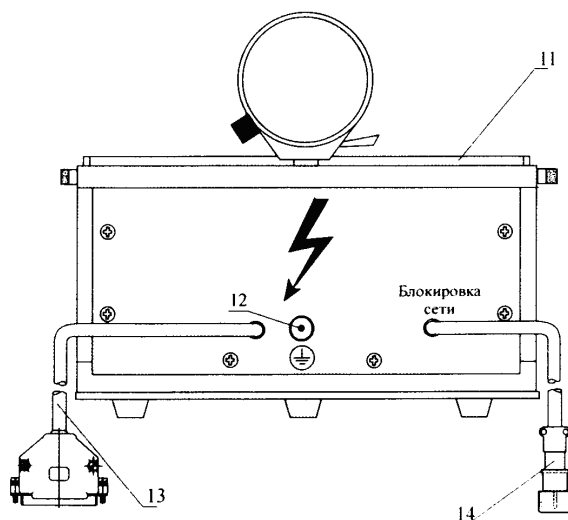


Рисунок 5.11 – Високовольтний пристрій. Вигляд ззаду

Вимірювальний пристрій служить для вимірювання та індикації випробувальної напруги, а також для управління роботою високовольтного пристрою. У пристрої розміщені джерела живлення, необхідні для роботи

самого вимірювального пристрою і для роботи високовольтного пристрою, генератор напруги, що повільно наростає, який управляє перетворювачем напруги в високовольтному пристрою, пристрій вибірки та зберігання, необхідне для фіксації напруги пробою, схема управління і аналого-цифровий перетворювач.

Високовольтний пристрій служить для отримання високої напруги, вимірювання товщини тонких випробовуваних зразків діелектриків за допомогою вимірювальної головки, а також як захисна камера для проведення експериментів.

У високовольтному пристрою розміщені перетворювач напруги, високовольтний дільник напруги, і система блокування, що складається з двох кінцевих перемикачів: один для блокування мережі, інший для блокування роботи генератора в перетворювачі напруги. Перетворювач напруги управляється за допомогою напруги, що повільно наростає, яка подається з вимірювального пристрою. З високовольтного дільнику вимірювана напруга надходить до вимірювального пристрою.

5.5.3. Мікроскоп (рис. 5.12) складається зі штатива з фокусуєчим механізмом (макро- і мікрогвинти), основи з освітлювальною лінзою-дзеркальцем, кронштейна з предметним столиком, монокулярної насадки з окуляром та диска з діафрагмами. На предметному столику встановлені пружинні тримачі.

Технічні характеристики: збільшення мікроскопа не менше 40 – 400х; збільшення об'єтивів не менше 4х; 10х; 40х; два окуляра: Н10х, Н16х; діапазон грубого (макро) фокусування: 50 мм; діапазон точного (мікро) фокусування: 1,8–2,2 мм; предметний столик: 120 x 110 мм; дзеркальце: діаметр 50 мм; довжина тубуса – 160 мм.



Рисунок 5.12 – Загальний вигляд мікроскопу

5.6. Методика виконання лабораторної роботи

5.6.1. Підготовка стенду до роботи

1. На рухомому стрижні вимірювальної головки у високовольтному пристрою відпустити закріплювальний гвинт і шляхом обертання встановити вертикально вниз один з чотирьох випробувальних електродів 4, 5 (рис. 5.10), потім закрутити закріплювальний гвинт (заміна електродів, що вийшли з ладу проводиться шляхом їх вигвинчування).

2. Провести грубу установку "0" головки вимірювального блоку шляхом обертання регулювальних гвинтів 8 (рис. 5.10), розташованих на опорних стійках вимірювальної камери.

3. Опустити захисний щиток вимірювального блоку і зробити точну установку "0" вимірювальної головки шляхом обертання ручки корекції 7 (рисунок 5.10).

4. Включити шнур живлення в мережу 50 Гц, 220 В, перевести мережевий вимикач 25 (рис. 5.9) вимірювального пристрою в положення "Включено". При цьому повинен світитися індикатор вихідної напруги 15 (рис.5.8) і показувати нульові значення всіх трьох цифрових розрядів.

5. Перевірити роботу блокування живлення високовольтного блоку захисним щитком, для чого слід підняти вгору захисний щиток 11 (рис. 5.11). При цьому індикатори вихідної напруги високовольтного блоку повинні згаснути. Треба опустити вниз захисний щиток і індикатори високовольтного блоку повинні засвітитися.

5.6.2. Порядок проведення роботи.

1. Вимкнути живлення стенду за допомогою мережевого перемикача 25 (рис. 5.9) вимірювального пристрою.

2. Плавню підняти захисний щиток високовольтного пристрою.

3. Обертанням гвинтів 9 (рис. 5.10) підняти прижимну планку пристрою кріплення зразка 10 (рисунок 5.10).

4. Підняти натиском на боковий важіль 2 (рис. 5.10) рухомий стрижень вгору і ввести між електродом і столом вимірювальної камери випробуваний зразок, після чого плавно відпустити боковий важіль головки.

5. Обертанням гвинтів опустити прижимну планку пристрою кріплення зразка.

6. Опустити захисний щиток високовольтного пристрою.

7. Зафіксувати значення товщини зразка за показаннями індикатора вимірювальної головки.

8. Увімкнути живлення стенду за допомогою мережевого вимикача вимірювального пристрою.

9. Натиснути і відпустити кнопку "ПУСК" вимірювального пристрою. При цьому на цифровому індикаторі будуть зображатися значення випробувальної напруги, яка лінійно наростає, і буде горіти відповідний світлодіод.

10. При виникненні пробою (починає блимати світлодіод "ПРОБІЙ" 16 (рис. 5.8) і спрацьовує звукова сигналізація) зафіксувати показання цифрового індикатора (гарантований час фіксації значення напруги пробою 5 с). **Примітка: для запобігання передчасного виходу стенду з ладу, при досягненні значення випробувальної напруги 25 кВ і відсутності пробою зразка, необхідно натиснути на кнопку "СКИДАННЯ".**

11. Натиснути і відпустити кнопку "СКИДАННЯ" високовольтного блоку. При цьому показання цифрового індикатора обнуляються, і засвітиться світлодіод "СКИДАННЯ".

12. Вимкнути живлення стенду за допомогою мережевого вимикача вимірювального пристрою.

13. Підняти захисний щиток високовольтного пристрою.

14. Обертанням гвинтів слід підняти прижимну планку пристрою кріплення зразка.

15. Натиском на боковий важіль вимірювальної головки підняти рухомий стрижень вгору і перемістити випробуваний зразок для отримання нової точки пробою.

16. Повторити послідовно операції, які описані вище. Зразок може бути випробуваний на пробій тільки один раз. Він може піддаватися пробою в декількох точках тільки з урахуванням вимоги, якщо відстань між точками пробою більше 45 мм.

17. Результати випробувань звести до таблиці.

18. При необхідності зміни випробувального електрода, повторити операції представлені вище.

19. Після закінчення роботи стенд потрібно відключити від мережі живлення, поточний випробувальний електрод 4, 5 повинен стосуватися електрода 6 (рис. 5.10) (між ними не повинно бути зразка), а захисний щиток опущений вниз.

20. Порівняти результати вимірювань товщини зразків оптичним мікрометром, вбудованого у випробувальний стенд.

21. Розрахувати середнє значення пробивної напруги $U_{прср}$ для чотирьох систем електродів: площа — площа, сфера — сфера, полу-сфера - полу-сфера; голка - голка кожного зразка.

22. Розрахувати пробивну напруженість $E_{пр}$ (електричну міцність) для кожного зразка.

23. Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці.

Таблиця 5.1 – Результати вимірів товщини, пробивної напруги, визначеної електричної міцності та пробивної напруженості зразків твердих діелектриків

№п/п	Товщина зразка, м		Пробивна напруга $U_{пр}$, В	Середнє значення пробивної напруги $U_{пр ср}$, В	Пробивна напруженість $E_{пр}$ (електрична міцність), В/м	Середнє значення пробивної напруженості $E_{пр ср}$ (електричної міцності), В/м
	Виміряне оптичним	Виміряне мікрометром				
1. Конденсаторний папір: 1.1. Зразок 1 1.2. Зразок 2 1.3. Зразок 3 1.4. Зразок 4						
2. Кабельний папір: 2.1. Зразок 1 2.2. Зразок 2 2.3. Зразок 3 2.4. Зразок 4						

24. Побудувати графічні залежності $U_{пр ср} = f(h)$.

25. Побудувати графічні залежності $E_{пр} = f(h)$.

26. Проаналізувати місця пробою зразків твердих діелектриків для трьох систем електродів за допомогою мікроскопу.



Площина – площина



Полусфера-полусфера

Рисунок 5. 13 – Місця пробою (обведено колом) при різній структурі електричного поля в зразках конденсаторного паперу

27. Пояснити отримані результати.

28. Оформити звіт з лабораторної роботи.

5.7.Контрольні питання

1. У чому полягає явище електричного пробою?
2. Що називається електричною міцністю?
3. У яких одиницях і чому саме в них вимірюється електрична міцність діелектриків?
4. Які причини пробою діелектриків?
5. Як пробивна напруга діелектрика пов'язана з електричною міцністю?
6. Як залежить електрична міцність $E_{пр}$ від товщини діелектрика?
7. У яких діелектриках можливий електричний пробій, тепловий пробій, електрохімічний пробій?
8. Перерахуйте види пробою твердих діелектриків та поясніть їх фізичну сутність.
9. Від чого залежить головним чином електрична міцність при електричній формі пробою?
10. З чим пов'язане зниження пробивної напруги діелектрика від часу?
11. За яких умов можливий електротепловий (тепловий) пробій?
12. Як пробивна напруга діелектрика залежить від його товщини?
13. Які фактори зумовлюють зниження електричної міцності при тепловій формі пробою?
14. Характерні риси електричного та теплового пробоїв.
15. Чим обумовлений електрохімічний пробій?
16. Які електроди використовуються для одержання однорідного поля?
17. Причини старіння діелектрика в електричному полі.

Список рекомендованої літератури

1. Поплавко Ю.М. Фізика діелектриків. К: НТУУ «КПІ», 2015. 572 с.
2. Поплавко Ю.М. , Переверзева Л.П., Воронов С.О., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. Частина друга. Діелектрики. К.: НТУУ «КПІ», 2007. 592 с.
3. Hippel R. Dielectrics and Waves. Boston, London: Artech House, 1954. 280 p.
4. Безпрозванних Г.В., Мірчук І.А. Синтез технологічних режимів охолодження та радіаційного опромінення електричної ізоляції кабелів. - Монографія, ISBN 978-617-7988-35-8, 5 розділів, 179 стор., 2021 р., видавництво ТОВ «Друкарня «Мадрид», м. Харків
5. Безпрозванних Г.В., Рогинський О.В. Конструктивно-технологічні рішення підвищення електричних характеристик високовольтної композитної електроізоляційної системи електричних машин. - Монографія, ISBN 978-617-8254-06-3, 4 розділи, 138 стор., 2023 р., видавництво ТОВ «Друкарня «Мадрид», м. Харків.
6. Безпрозванних Г.В., Костюков І.О., Москвітін Є.С. Розділення абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції за кривими відновлювальної напруги силових високовольтних кабелів. Технічна електродинаміка, 2021, №6, стор. 13–19.
7. Безпрозванних Г.В., Гринишина М.В. Ефективні параметри діелектричної абсорбції полімерної ізоляції з напівпровідними покриттями силових високовольтних кабелів/ Електротехніка і Електромеханіка. 2022. №3. - с. 1-8.
8. G. V. Bezprozvannykh, M. V. Grynysyna Dielectric Losses of Power High Voltage Cables in a Wide Frequency Range. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 - Conference Proceedings, 2022.
9. Безпрозванних Г.В., Кессаєв О.Г., Гаврилюк І.Ю. Стенд для дослідження електричних властивостей з візуалізацією процесу поляризації активних діелектриків. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика надійність та енергоефективність. 2019, № 29 (1354).
10. G. V. Bezprozvannykh; Y.S. Moskvitin Physical Processes of Aging and Assessment of the Technical Condition of Power Cables with Paper-Impregnated Insulation. 2023 IEEE 4rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2023 - Conference Proceedings, 2023.
11. Безпрозванних Г.В., Москвітін Є.С. Стратегія управління старінням кабелів атомних електричних станцій. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2022, № 11-12. С. 177-178.

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізика діелектриків» для студентів денної та заочної форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» / Безпрозванних Г.В., Кессаєв О.Г., Москвітін Є.С. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2024. – 100 с.

Укладачі:

БЕЗПРОЗВАННИХ Ганна Вікторівна
КЕССАЄВ Олександр Геннадійович
МОСКВІТІН Євген Сергійович

Відповідальний за випуск проф. Безпрозванних Г.В.

Роботу до видання рекомендував проф. Борисенко А.М.

В авторській редакції

План 2024 р., поз. 486

Підп. до друку Формат 60x84 1/16.
Папір офсет. Друк ризографічний. Ум. друк. арк. 4,5.
Обл.вид. арк.
Наклад 50 прим. Замовлення №

Видавничий центр НТУ «ХПІ»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія