

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Дніпровська політехніка"**



Кафедра електротехніки



**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни:
«Електротехнічні матеріали»
(Розділ «Діелектричні матеріали»)
для студентів спеціальності:
141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Дніпро
2021**

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Дніпровська політехніка"**



Кафедра електротехніки



**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни:
«Електротехнічні матеріали»
(Розділ «Діелектричні матеріали»)
для студентів спеціальності: 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Дніпро
2021**

Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом (протокол № від за поданням науково-методичної комісії зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (протокол № 21/22-01 від 30.08.2021р.)

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни Електротехнічні матеріали (Розділ “Діелектричні матеріали”) для студентів спеціальності 141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Упорядники: Циценков Д.В., Гребенюк А.М., Бобров О.В., Колб А.А., Лябагова Т.В. – Дніпро: НТУ “ДП”, 2022. – 40 с.

Автори:

Циценков Д.В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри електротехніки НТУ «ДП»
Гребенюк А.М., к.т.н., доцент каф. економічної та інформаційної безпеки
ДДУВС
Бобров О.В., к.т.н., доцент кафедри електротехніки НТУ «ДП»
Колб А.А., к.т.н., доцент, доцент с
Лябагова Т.В., асистент к.т.н., доцент кафедри електротехніки НТУ «ДП»

Методичні вказівки призначено для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електротехнічні матеріали» (розділ «Діелектричні матеріали») студентами спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

ВСТУП

Метою виконання студентами лабораторних робіт є вивчення методів випробування матеріалів та одержання ряду залежностей, що характеризують властивості матеріалів і фізичні процеси, які в них відбуваються.

Пристаючи до виконання лабораторної роботи, студенти повинні чітко уявляти поставлене перед ними завдання та ті фізичні явища, яке доведеться дослідити. Їм слід зрозуміти, якими способами здійснюються ці дослідження та добре знати будову приладів і апаратів, якими доведеться користуватися при виконанні роботи.

Виходячи з цього, студентам треба завчасно підготуватися до занять. Для полегшення цієї підготовки опису кожної лабораторної роботи в посібнику передують короткі теоретичні відомості про досліджуване явище, процес та спосіб дослідження. Наведені теоретичні відомості придатні лише для попереднього ознайомлення з об'єктом дослідження і свідомого виконання роботи. Для ґрунтовного ж вивчення досліджуваного явища або процесу необхідно користуватися підручниками.

Опис кожної лабораторної роботи завершується контрольними запитаннями, необхідними для самоперевірки набутих знань. В кожній роботі є вказівки відносно складу звіту. Окрім зазначеного, до звіту, на свій розсуд, студенти можуть включати і додатковий матеріал. Звіт по кожній лабораторній роботі кожен студент виконує індивідуально, акуратно, відповідно до поставлених вимог (з ними студенти знайомляться в лабораторії) і обов'язково подає викладачеві перед початком наступного заняття. При здачі (захисті) лабораторної роботи студент повинен знати:

- 1) розділи теоретичної частини дисципліни стосовно даної роботи;
- 2) схему, призначення її окремих елементів та принцип дії установки, яка використовується в роботі;
- 3) методику проведення експерименту та правила техніки безпеки;
- 4) властивості та галузі застосування досліджуваних електротехнічних матеріалів.

Правила техніки безпеки під час роботи в лабораторії

А. Організаційні

1. До роботи в лабораторії допускаються студенти, які прослухали інструктаж з техніки безпеки (ТБ), засвоїли правила ТБ і розписалися про це в спеціальному журналі.

2. Із складу бригади студентів призначається бригадир, відповідальний за виконання студентами правил безпеки. Тільки бригадир під час проведення дослідів вмикає та вимикає електроживлення схеми або установки.

3. Перше вмикання установки під напругу робиться тільки після перевірки викладачем зібраної схеми і в його присутності.

4. Бригада студентів протягом часу роботи в лабораторії повинна перебувати на відведеному робочому місці.

5. Після закінчення роботи бригада наводить порядок на робочому місці, про що повідомляє викладача.

Б. Технічні

1. Складання схем необхідно виконувати так, щоб не було перехрещення проводів, натягнутого їх стану, не допускати різких згинів та змотування проводів в мотки. Контакти в місцях з'єднання елементів схеми повинні бути надійними.

2. Вимірювальні прилади за апарати управління слід розміщувати на робочому столі так, щоб було зручно ними користуватися і спостерігати за показом приладів.

3. Починаючи роботу, треба переконатися, що на робочому місці немає напруги, для чого всі вимикачі, рубильники, тумблери поставити в положення "вимкнено".

4. Перед поданням напруги слід переконатися, що всі регулюючі апарати знаходяться в необхідному початковому положенні. Після вимкнення напруги відновити початкове положення на всіх регульованих апаратах.

5. Якщо до, або в ході роботи виявлена несправність устаткування, то слід припинити роботу, вимкнути напругу і повідомити викладача або лаборанта про такий факт. **Усувати неполадки своїми силами заборонено.**

6. Встановлення та заміну запобіжників слід виконувати при вимкненому автоматичному вимикачеві (автоматі) мережі живлення і з дозволу викладача.

7. Розбір схеми (за необхідністю) слід виконувати тільки після вимкнення електроживлення та знятих запобіжниках.

8. Під час робіт на високовольтній установці слід переконатися в її надійному заземленні, справності систем сигналізації та блокіровок. Необхідно ознайомитись із спеціально складеною для високовольтної установки інструкцією з техніки безпеки, яка є в лабораторії.

9. Всі високовольтні випробування треба виконувати, стоячи на гумовому килимку, в гумових рукавицях та ботах.

Забороняється:

- а) торкатися неізольованих місць схеми, яка знаходиться під напругою;
- б) виконувати будь-які зміни в схемі під напругою або залишати схему під напругою без догляду;
- в) виконувати будь-які вмикання на головному розподільному щиті в лабораторії;
- г) виконувати лабораторну роботу одному студенту.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТМ - 1/1

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: Ознайомлення зі зразками, вивчення властивостей та сфер застосування електроізоляційних матеріалів, перелік яких запропонує викладач.

Програма роботи

1. Ознайомитись зі зразками електроізоляційних матеріалів, звернувши увагу на їх зовнішні ознаки.
2. Вивчити властивості та сфери застосування електроізоляційних матеріалів.
3. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення зовнішніх ознак зразків електроізоляційних матеріалів

Ознайомитися зі зразками електроізоляційних матеріалів, які наведені в одному із стовпців табл. 1.1 (номер стовпця пропонує викладач). Звернути увагу на структуру зразків електроізоляційних матеріалів, їх колір, твердість, ступінь прозорості, будову поверхні та інші ознаки, за якими можна визначитися з назвами матеріалів та їх походженням.

Етап 2. Вивчення властивостей та сфер застосування електроізоляційних матеріалів

Основні властивості, характеристики, сфери застосування та початкові матеріали для виготовлення зразків електроізоляційних матеріалів необхідно описати за формою табл. 1.2, користуючись методичними вказівками до даної лабораторної роботи та рекомендованою літературою.

Етап 3. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву, мету та програму роботи.
2. Заповнену табл. 1.2.

Таблиця 1.1

Електроізоляційні матеріали

1	2	3	4	5	6
Міканіт	Слюда	Мікастрічка	Скломіка-стрічка	Скло	Колекторний міканіт
Електрокартон	Полівініл-хлорид	Плівкоелектрокартон	Полістірол	Гетинакс	Поліетилен
Текстоліт	Каніфоль	Шелак	Гума	Епоксидна смола	Поліамідна смола
Поліетилен	Склотекстоліт	Фтороласт-4	Слюда	Кабельний папір	Каніфоль
Гетинакс	Бітум	Конденсаторний папір	Каніфоль	Фторопласт-4	Полівінілхлорид
Лакотканина	Фарфор	Пластикат із полівінілхлориду	Політетрафторетиле́н	Склотекстоліт	Текстоліт
Гума	Полістирол	Склотканина	Органічне скло	Трансформаторне масло	Електрокартон
Фторопласт-4	Поліметил-метакрилат	Скло	Поліетилен	Міканіт	Бітум
Кабельний папір	Поліетилен	Капрон	Фольгований гетинакс	Плівкоелектрокартон	Конденсаторний папір
Азбест	Азбоцемент	Гетинакс	Лакотканина	Капрон	Лакотканина
Вініпласт	Гетинакс	Фольгований текстоліт	Текстоліт	Оргскло	Фарфор
Бакеліт	Парафін	Епоксидна смола	Азбест	Шелак	Бакеліт

Таблиця 1.2

ПРИКЛАД

Основні властивості електроізоляційних матеріалів

Матеріал	Характерні зовнішні дані, механічні властивості	Початкові матеріали, спосіб одержання, будова, тощо	Основні електроізоляційні властивості				Інші властивості (хімічна стійкість, во-логостійкість, радіаційна стійкість)	Клас нагрівостійкості та допустима робоча температура	Сфера застосування
			ε_r	ρ_v , Ом·м	$tg \delta$	E_m , кВ/мм			
Міканіт	Листовий матеріал із пластинок слюди, які склеєні між собою та наклеєні на підкладку із паперу. Твердий. При згинанні розшаровується на окремі пластинки	Пластинки слюди, смола. Одержують склеюванням пластинок слюди	-	10^{10} - 10^{12}	0,05	15-60	При опромінюванні нейтронами електрична міцність зменшується на 60%	F, H, C 155°C, 180 °C	Колекторні манжети, ізоляція між колекторними пластинами електромашин, пазова ізоляція, прокладки між секціями обмоток електромашин

де ε_r – відносна діелектрична проникність;
 ρ_V – питомий об'ємний опір, Ом·м;
 $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;
 E_m – електрична міцність, кВ/мм

Методичні вказівки

До етапів 1, 2 і 3

Електроізоляційні матеріали відповідно до їх хімічної будови діляться на **органічні** (сполуки вуглецю з воднем, азотом, киснем та деякими іншими елементами) і **неорганічні**. Окрема група матеріалів - **елементоорганічні**, в основу будови яких, крім вуглецю, кисню, азоту, входять атоми кремнію, магнію, алюмінію, титану та інших елементів, що не є характерним для звичайних органічних речовин.

Багато органічних електроізоляційних матеріалів - гнучкі та еластичні, з них можуть вироблятися волокна, плівки, вироби різноманітних форм. Нажаль, вони мають відносно низьку нагрівостійкість.

Неорганічні електроізоляційні матеріали здебільшого не відзначаються гнучкістю та еластичністю. Вони мають високу нагрівостійкість і застосовуються у тих випадках, коли необхідно забезпечити надійну роботу електричної ізоляції при високих температурах.

Органічні полімери

Більшість органічних електроізоляційних матеріалів належить до високомолекулярних сполук (полімерів), тобто є речовинами з дуже великими молекулами, що інколи вміщують у собі багато тисяч атомів. За будовою полімери можуть бути лінійними, розгалуженими та сітчастими.

Лінійні полімери – сполуки, молекули яких хімічно зв'язані між собою в одному напрямку і мають форму витягнутої лінії. У такої молекули відношення її довжини до поперечного розміру надзвичайно велике (1000 і більше). Лінійні полімери гнучкі та еластичні, більшість з них при помірному підвищенні температури розм'якшуються та плавляться. Розгалужені та сітчасті полімери – тверді, крихкі; плавлення їх відбувається при високих температурах, а багато з них при нагріванні руйнуються (згоряють, зуглюються). Тому лінійні полімери ще називають **термопластичними** матеріалами, а розгалужені та сітчасті – **термореактивними**. Лінійні полімери здатні розчинятися у розчинах, а **розгалужені** та **сітчасті** полімери важко піддаються розчину і значна їх частина практично нерозчинна. До лінійних полімерів належать поліетилен, полівінілхлорид, фторопласт, капрон, до розгалужених та сітчастих – бакеліт, ебоніт, епоксидна смола у твердому стані.

Більшість лінійних полімерів здатна при витягці з розплавів утворювати тонкі та міцні волокна, з яких можна виготовляти текстильні матеріали і плівки. Розгалужені та сітчасті полімери нездатні утворювати плівки та текстильних волокон. Відомо два способи одержання полімерних речовин з мономерів: полімеризація та поліконденсація.

Полімеризація - це хімічний процес утворення полімерів з мономерів, в якому бере участь одна початкова проста речовина (мономер). Реакція відбувається без виділення побічних продуктів. Хімічний склад мономера і полімера однаковий, хоча властивості суттєво різні. Реакція полімеризації відбувається під дією нагріву, високого тиску, ультрафіолетових променів, каталізаторів тощо. Прикладом полімеризації може стати процес отримання поліетилену з газу етилену.

Поліконденсація – це процес утворення полімерних сполук з мономерів, що відбувається з перегрупуванням молекул і виділенням побічних продуктів (води, аміаку та інших). У реакції поліконденсації завжди бере участь не менше двох різних хімічних речовин. Приклад поліконденсації – фенол-формальдегідна смола, яка утворюється при взаємодії фенолу і формальдегіду. Побічний продукт – вода.

Деякі давно одержані полімери, незважаючи на різне походження та різноманітні властивості, зберегли назву „штучні смоли”. Ця ж назва інколи вживається і до відносно нових полімерів.

Полімери природного походження мають назву „природні смоли”. Вони є продуктом життєдіяльності деяких комах (смола шелак) або рослин-смолоносців (каніфоль). Одержують їх майже в готовому вигляді і лише при нескладних операціях очищення і переплавки.

Смоли (в основному, штучні) є основним початковим матеріалом при виготовленні лаків, плівок, пластмас, волокнистих матеріалів тощо

Пластмаси

Пластичні маси (пластмаси, пластики) у більшості випадків складаються з двох компонентів: сполучного та наповнювача.

Сполучний компонент – це, як правило, органічна високомолекулярна сполука – смола, яка має клеючу здатність, а також здатність до пластичної деформації під дією зовнішнього тиску та нагріву. В окремих випадках застосовують і неорганічне сполучне (приклад - цемент в азбоцементі).

Наповнювач – речовина, яка міцно зчеплена з сполучним та може бути порошкоподібною, волокнистою, листовою (бавовна або скловолокно, слюда, папір, тканина і т.п.). Наповнювач суттєво здешевлює пластмасу і одночасно може поліпшувати її механічні властивості (збільшити міцність, зменшити крихкість). Електроізоляційні властивості внаслідок введення наповнювача можуть погіршуватися, тому в деяких високоякісних пластмасах наповнювач відсутній (поліетилен, полістирол).

До пластмас інколи додають *пластифікатори*, які збільшують пластичність та зменшують крихкість матеріалів, *барвники*, які надають пластмасам певного забарвлення, та інші добавки.

Термопластичні полімери

Поліетилен – продукт полімеризації газу етилену, має білий чи світло-сірий колір, твердий, жирний на дотик. Поліетилен високого тиску (ВТ) одержують при тиску в 120...150 МПа і температурі близько 200°C в присутності кисню (0,05%), середнього тиску (СТ) – при тиску 3...4 МПа і температурі нижче 150°C із застосуванням окислів металів (Cr_2O_3 , MoO_3) як каталізаторів. Поліетилен низького тиску (НТ) одержують при температурі 60°C і тиску нижче 1 МПа. Поліетилен – полімер з лінійною структурою молекул, неполярний, у тонких шарах прозорий; стійкий до дії кислот та випромінювання; розчиняється при температурі вище 90°C у ксилолі, толуолі, бензині та мінеральних маслах. У полум'ї оплавляється та горить. Поліетилен має високі електроізоляційні властивості: $\rho_v = 10^{13} \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon_r = 2,3 \dots 2,4$; $\text{tg}\delta = (1 \dots 5) \cdot 10^{-4}$; $E_m = 15 \dots 20 \text{ кВ/мм}$. Опромінення поліетилену елементарними частинками з великою енергією призводить до утворення складних просторових молекул із поперечними зв'язками поміж лінійними ланцюгами молекул (сітчастих структур), що підвищує нагрівостійкість до 105°C (для звичайного поліетилену 90°C, клас Y). Поліетилен виготовляють у вигляді гранул. Вироби з нього одержують ливарним способом під тиском. Із поліетилену ВТ виготовляють плівки завтовшки 30...200 мкм і завширшки до 1,5 м, із НТ і СТ – шланги, трубки для поверхневої ізоляції кабелів, каркаси для котушок тощо.

Фторопласт-4 одержують шляхом полімеризації газу тетрафторетилену $\text{F}_2\text{C} = \text{CF}_2$ (етилен, у молекулі якого всі атоми водню заміщені атомами фтору). На вигляд – це білий або сіруватий напівпрозорий матеріал; його густина значна порівняно з густиною інших органічних полімерів і складає $(2,1 \dots 2,3) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Матеріал порівняно м'який, має схильність до плинності в холодному стані, неполярний. За електроізоляційними властивостями фторопласт-4 є одним з найкращих діелектриків: $\rho_v = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon_r = 1,9 \dots 2,1$; $\text{tg}\delta = (1 \dots 3) \cdot 10^{-4}$; $E_m = 20 \dots 30 \text{ кВ/мм}$. Фторопласт-4 має надзвичайно високу для органічного діелектрика нагрівостійкість (+250°C), що пояснюється великою енергією зв'язку між атомами С–F та екрануючим впливом атомів F на зв'язок між атомами С. Морозостійкість матеріалу характеризується збереженням гнучкості при температурі нижче мінус 80°C, а для тонких плівок – навіть нижче мінус 100°C. Фторопласт-4 надзвичайно хімічно стійкий, перевершуючи у цьому відношенні золото та платину. Він цілковито негорючий, практично не гігроскопічний і не змочується водою та іншими рідинами. Фторопласт-4 має незначну радіаційну стійкість (при дії іонізуючого випромінювання вироби з нього втрачають механічну міцність і навіть можуть перетворюватися на порошок), а також руйнується під впливом ультрафіолетового випромінювання.

Застосовується у відповідальних випадках при одночасній дії на ізоляцію високих або низьких температур, хімічно активних середовищ, вологи тощо.

Полівінілхлорид – твердий продукт полімеризації газоподібного мономеру - вінілхлориду $\text{H}_2\text{C} = \text{CH} - \text{Cl}$, яка відбувається у присутності перекису водню. Полівінілхлорид (ПВХ) при нормальній температурі – тверда, крихка, жовтувата на вигляд смола; відзначається високою хімічною стійкістю проти дії води, кислот, спирту, гасу, бензину, озону, опромінення. Розчиняється ПВХ у діхлоретані, хлорбензолі, частково в ацетоні, бензолі. У полум'ї ПВХ горить, але не підтримує горіння. Легко забарвлюється в різні кольори та піддається обробці різними способами: штампуванням, свердлінням, струганням, зварюванням тощо. Залежно від кількості введенного пластифікатора і характеру переробки із ПВХ одержують матеріали з вельми різноманітними якостями. Непластифікований ПВХ називається вініпластом. Внаслідок асиметрії побудови (через присутність у молекулах атомів Cl) ПВХ є полярним діелектриком і має знижені діелектричні властивості порівняно з неполярними полімерами. Для вініпласта: $\rho_v = 10^{13} \dots 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\epsilon_r = 3,2 \dots 3,6$; $\text{tg} \delta = 0,03 \dots 0,08$; $E_m = 15 \dots 20 \text{ кВ/мм}$, нагрівостійкість $+90^\circ\text{C}$. Використовують для виготовлення акумуляторних банків, ізоляційних трубок тощо. Пластифікований ПВХ називають полівінілхлоридним пластиком і застосовують для ізоляції проводів та кабелів низької напруги, трубок для допоміжної ізоляції, липких ізоляційних стрічок, плівок. Нагрівостійкість $80 \dots 90^\circ\text{C}$, хімічна стійкість у порівнянні з вініпластом менша; через присутність домішок його електричні властивості також знижені. Хлорований ПВХ (перхлорвініл) має кращу розчинність і використовується при виготовленні штучних волокон, тканин, стрічок, лаків та емалей, що захищають електроапарати від корозії.

Поліімідні смоли містять у собі імідне угруповання атомів ... $-\text{CO}-\text{N}-\text{CO}-\dots$ і є дуже якісними матеріалами. Вони належать до найбільш нагрівостійких полімерів; їх тривала робоча температура не менша $+220^\circ\text{C}$. Плівка із поліімідних смол не розм'якшується і не плавиться при температурі до $+800^\circ\text{C}$. Крім того, полііміди мають значну морозостійкість – при криогенних температурах аж до -269°C їх механічні властивості практично не змінюються. Вони стійкі до органічних розчинників, масел та розбавлених кислот, але недостатньо стійкі до лугу і перегрітої пари. Вода у звичайних умовах на полііміди не діє, навіть при кип'ятінні у воді поліімідні плівки зберігають гнучкість. Полііміди стійкі також до дії іонізуючого випромінювання. Електричні та механічні властивості поліімідів такі: густина $(1,28 \dots 1,48) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\rho_v = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\epsilon_r = 3,5$; $\text{tg} \delta = (6 \dots 16) \cdot 10^{-4}$; $E_m = 160 \dots 200 \text{ кВ/мм}$; межа міцності при розтягуванні $160 \dots 180 \text{ МПа}$. З поліімідів виробляють плівки, які використовують у конденсаторах, нагрівостійких кабельних виробках, ізоляції електричних машин, а також лаки для покриття проводів та просочення невеликих котушок.

Термореактивні полімери

Фенолформальдегідні (бакелітові) смоли є продуктами поліконденсації фенолу C_6H_5OH з формальдегідом H_2CO . Одержують їх внаслідок нагрівання у закритому котлі водного розчину фенолу і формальдегіду в присутності каталізатора. У разі надлишку фенолу та при використанні в реакції лужного каталізатора (наприклад, аміаку) одержують термореактивну смолу – бакеліт. Безпосередньо після варіння смола перебуває у стадії А (резол) і називається резольною. Резол розм'якшується при температурі $55...80^{\circ}C$, розчиняється у спирті та ацетоні. При нагріванні до температури $100...140^{\circ}C$ бакеліт твердішає і переходить у проміжну стадію В – резитол, який не розчиняється, але набухає в розчиннику. Якщо нагрівання продовжити до $2...4$ години, то бакелітова смола переходить в кінцеву стадію С – резит, в якій вона не розчиняється і не плавиться, тобто стає термореактивною. Бакеліт у стадії С, де він перебуває в працюючій ізоляції, має високу механічну міцність і непогані характеристики: $\rho_v = 10^{11}...10^{12}$ Ом·м; $\epsilon_r = 5,0...6,5$; $tg\delta = 0,01...0,1$; $E_m = 10...20$ кВ/мм. Він не розчиняється у спирті та ацетоні, стійкий до дії води, бензину, масел, сірчаної та соляної кислот, але під дією азотної кислоти та випромінювання руйнується. Бакеліт – полярний діелектрик. Недоліки резиту: мала еластичність та схильність до трекінгу, тобто до утворення на поверхні під дією поверхневих електричних розрядів електропровідних “доріжок”. Бакелітову смолу використовують для виготовлення гетинаксу, текстоліту, паперово-бакелітових намотаних виробів (циліндрів для обмоток трансформаторів, трубок, ізоляційних втулок тощо), клеїв, пластмас. На основі бакеліту виготовляють порошки для гарячого пресування масових виробів (вимикачів, розеток, кнопок, штепсельних вилок і т.п.), а також виробів складної конфігурації (корпусів приладів, корпусів апаратів зв'язку та ін.). До термореактивних полімерів належать також затверділі епоксидні смоли, ебоніт, ескапон.

Шаруваті пластики

Шаруваті пластики використовують як конструкційний та електроізоляційний матеріал, де наповнювачем є волокнистий матеріал. Вони мають хороші електроізоляційні та механічні властивості.

Гетинакс – шаруватий пластик, який одержують гарячим пресуванням паперу, просоченого фенолформальдегідною смолою в стадії А або іншими смолами такого ж типу. Просочений папір стискають стальними нагрітими плитами гідравлічного пресу. За час пресування фенол-формальдегідна смола плавиться, заповнює пори між волокнами паперу та окремими його листами, твердішає і міцно зв'язує окремі шари паперу. Діелектричні характеристики гетинаксу: $\rho_v = 10^8...10^{11}$ Ом·м; $\epsilon_r = 5...6$; $tg\delta = 0,03...0,4$; $E_m = 20...40$ кВ/мм.

Текстоліт – пластик, аналогічний гетинаксу, виготовляють з просоченої відповідною смолою тканини. Порівняно з гетинаксом текстоліт має

підвищену ударну в'язкість та стійкість при терті, але гірші властивості: $\rho_v=10^8 \dots 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\epsilon_r=5 \dots 6,5$; $\text{tg}\delta=0,06 \dots 0,8$; $E_m=4,5 \dots 16 \text{ кВ/мм}$.

Склотекстоліт виготовляється з просоченого смолою скловолокна, має вищу нагрівостійкість і механічну міцність.

Азбоцемент – неорганічна речовина, в якій азбест є наповнювачем, а цемент – зв'язуючим матеріалом. Має високу нагрівостійкість і легко піддається механічній обробці. Через значну гігроскопічність азбоцемент має невисокі діелектричні властивості. Просочування парафіном, бітумом чи смолами зменшує ці недоліки і забезпечує електричну міцність в $2 \dots 3 \text{ кВ/мм}$. Азбоцемент використовують в електрообладнанні низької напруги (основа контакторів, перегородки та іскрогасні камери в електричних апаратах, розподільні щитки).

Слюда та матеріали на її основі

Слюда – природний діелектрик, зустрічається у вигляді кристалів, характерною особливістю яких є властивість легко розшаровуватися на дуже тонкі пластинки. Найважливіші види слюди – мусковіт і флогопіт (табл.1.3). Мусковіт має різноманітні відтінки; флогопіт більш темний. За діелектричними та механічними властивостями мусковіт краще флогопіту.

Таблиця 1.3

Діелектричні властивості слюди

Вид слюди	ρ_v , Ом·м	ρ_s , Ом	ϵ_r	tgδ		E_m , кВ/мм
				при $f=50 \text{ Гц}$	при $f=1 \text{ МГц}$	
Мусковіт	$10^{12} \dots 10^{16}$	$10^{11} \dots 10^{12}$	6,8...7,2	0,015	0,0003	до 200
Флогопіт	10^{12}	$10^{10} \dots 10^{14}$	6,0...6,2	0,05	0,0015	до 100

Слюда належить до матеріалів з високою нагрівостійкістю ($+550 \dots 900^\circ\text{C}$), має високу механічну міцність та вологостійкість. Використовується слюда для виготовлення міканітів, мікастрічок, слюдяних конденсаторів, шайб, прокладок.

Міканіти – це листові або рулонні матеріали, що виготовлені із слюди, листочки якої склеюють лаком або смолою. Іноді застосовують “підкладки” з паперу або тканини, що наклеюються для збільшення механічної міцності. Міканіти мають високу нагрівостійкість. При використанні кремнійорганічних смол та неорганічних підкладок одержують міканіти класів нагрівостійкості F та H. Колекторний міканіт виготовляється з флогопіту. Він вставляється поміж мідними пластинами колекторів електричних машин. Гнучкі міканіти мають малу товщину (не більше 0,5 мм) і використовуються для ізоляції провідникових частин електричних машин та апаратів. Електричні властивості міканітів такі: $\rho_v=10^{10} \dots 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\text{tg}\delta=0,05$; $E_m=15 \dots 60 \text{ кВ/мм}$.

Нагрівостійкість

Нагрівостійкість – це здатність електроізоляційних матеріалів та виробів з них виконувати свої основні функції без пошкоджень і недопустимого

погіршення властивостей під впливом високої температури. Електроізоляційні матеріали, які використовуються в електричних машинах, трансформаторах та апаратах, поділяють на класи нагрівостійкості згідно з табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Розподіл діелектриків за нагрівостійкістю

Клас нагрівостійкості	Допустима робоча температура, °C	Основні групи електроізоляційних матеріалів відповідно до класів нагрівостійкості
Y	90	Волокнисті матеріали з целюлози, бавовни, шовку та поліамідів, які не просочені рідинним електроізоляційним матеріалом, полівінілхлорид, гума з натурального каучуку, поліетилен, полістирол
A	105	Волокнисті матеріали, які просочені лаками, поліамідна плівка, полівінілацетатні лаки
E	120	Пластмаси з органічним наповнювачем та термореактивним сполучним (гетинакс, текстоліт), епоксидні смоли, полікарбонатні плівки
B	130	Матеріали на основі слюди, азбесту, скловолокна з органічними сполучними, міканіт, склотекстоліт, склолакотканина, поліуретанові лаки; політрифторхлоретилен
F	155	Міканіти без підкладок або з неорганічними підкладками із застосуванням органічних сполучних підвищеної нагрівостійкості (епоксидних, кремнійорганічних смол), вироби на основі скловолокна з просоченням
H	180	Матеріали на основі слюди, азбесту, скловолокна в сполученні з кремнійорганічними смолами підвищеної нагрівостійкості, кремнійорганічні еластополімери, фторопласт-4

Для матеріалів, які мають працювати при більш високих температурах, уведено класи 200, 220 і 250 (робочі температури 200, 220 і 250°C). До них належать деякі види слюди, керамічні матеріали, скло, які застосовуються без зв'язуючих сполук або з неорганічними сполучними. Для ще більш високих робочих температур допускається введення класів 275, 300 ... (через кожні 25°C).

Віднесення матеріалів до певного класу нагрівостійкості проводиться на основі досвіду експлуатації або випробувань. Аналіз даних багаторічної експлуатації електричних машин виявив, що строк служби їх ізоляції, а отже і машин, становить 15...20 років. При перевищенні температури обмотки максимально допустимого значення (відповідного класу нагрівостійкості ізоляції) термін служби електричних машин різко знижується. Так, для ізоляції класів А і В при перевищенні температури приблизно на кожні 10°C термін служби зменшується вдвічі.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні властивості електроізоляційних матеріалів.
2. Обґрунтуйте найважливішу (з Вашої точки зору) властивість електроізоляційних матеріалів.
3. Як Ви розумієте поняття “електрична ізоляція”?

4. Чим відрізняються термопластичні та термореактивні матеріали?
5. Які синтетичні полімери найчастіше використовуються як електроізоляційні матеріали?
6. Назвіть компоненти пластмас. Який з них є основним?
7. Перелічіть основні діелектричні властивості поліетилену та полівінілхлориду, наведіть сферу їх застосування як електроізоляційні матеріали та допустимі робочі температури для них.
8. Охарактеризуйте фторорганічний діелектрик фторопласт -4.
9. Як впливає радіоактивне опромінення на властивості поліетилену, фторопласту-4?
10. Опишіть спосіб одержання та сферу застосування фенолформальдегідних смол.
11. Опишіть відомі електроізоляційні шаруваті пластмаси, їх властивості та сфери застосування.
12. Назвіть найважливіші природні смоли, їх властивості та сфери застосування.
13. Назвіть особливості, властивості та сферу застосування слюди (мусковіту та флогопіту) як електроізоляційного матеріалу.
14. Назвіть основні види міканітів, їх склад, властивості.
15. Яке практичне значення має нагрівостійкість електроізоляційних матеріалів??
16. Наведіть приклади розподілу електроізоляційних матеріалів за окремими класами нагрівостійкості.
17. Як впливає збільшення температури обмоток та їх ізоляції на строк служби електричних машин?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТМ - 1/2

ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМНОГО ТА ПОВЕРХНЕВОГО ПИТОМИХ ОПОРІВ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи:

Вивчити технічні засоби вимірювання об'ємного та поверхневого опорів твердих діелектриків.

Програма роботи

1. Вивчення загальних відомостей про електропровідність діелектриків.
2. Вивчення принципу дії технічних засобів для вимірювання об'ємного та поверхневого опорів твердих діелектриків.
3. Вимірювання об'ємного опору діелектриків.
4. Вимірювання поверхневого опору діелектриків.
5. Обробка експериментальних даних.
6. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення інформації про електропровідність діелектриків

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, засвоїти інформацію про електропровідність твердих діелектриків. Звернути увагу на те, що електропровідність твердих діелектриків кількісно характеризують питомою об'ємною γ_v та поверхневою γ_s електропровідністю або, що найчастіше, питомим об'ємним ρ_v та поверхневим ρ_s опорами.

Етап 2. Вивчення тераомметра приладу для вимірювання об'ємного та поверхневого опорів твердих діелектриків

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, вивчити принцип дії тераомметра. Звернути особливу увагу на схеми вмикання електродів вимірювального приладу (рис. 2.1, 2.2), які забезпечують розподіл струму діелектрика на його складові частини і зменшити таким чином похибку вимірювання. Безпосередньо перед початком вимірювання необхідно ознайомитися з інструкцією та порядком роботи з тераомметром.

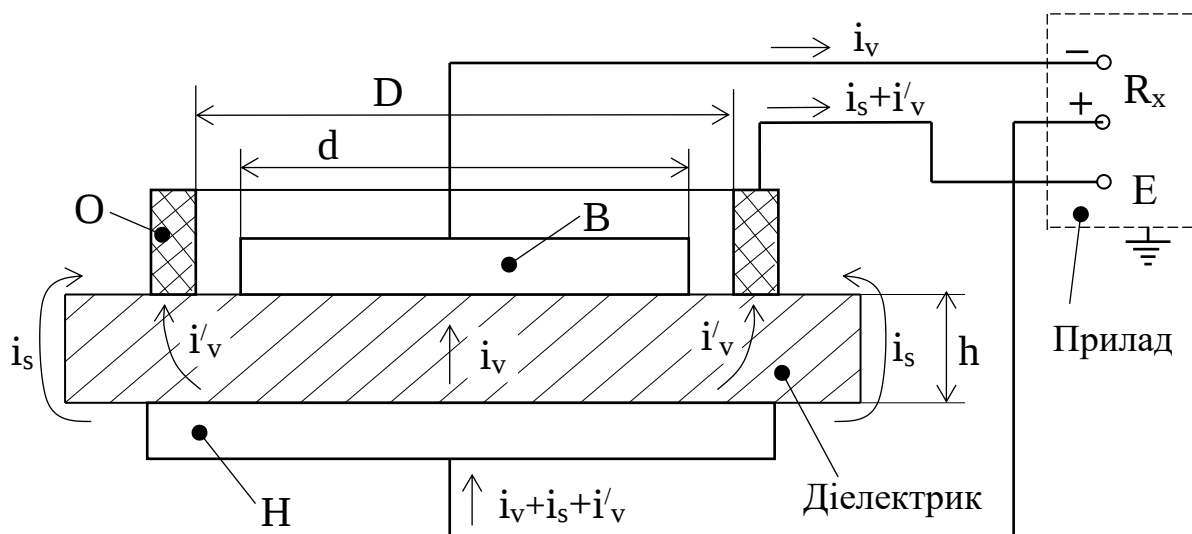


Рисунок 2.1 – Схема вмикання електродів для вимірювання об'ємного опору твердого діелектрика

Етап 3. Вимірювання об'ємного опору зразків діелектриків

Вимірювання об'ємного опору зразків твердих діелектриків проводити у такій послідовності:

– виміряти і записати у табл. 2.1 значення діаметра d вимірювального електроду B та внутрішнього діаметру D охоронного електроду O ;

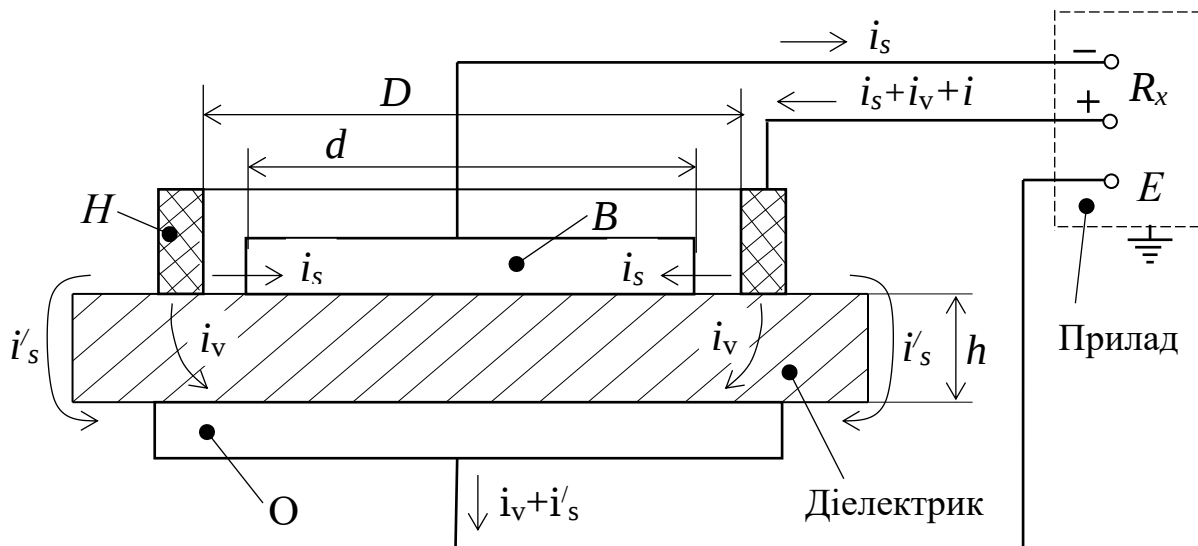


Рисунок 2.2 – Схема вмикання електродів для вимірювання поверхневого опору твердого діелектрика

- виміряти і записати в табл. 2.1 значення товщини h зразків твердих діелектриків, які запропоновані викладачем для досліджень;
- зібрати схему згідно з рис. 2.1;
- виміряти об’ємний опір R_v зразків, користуючись першою чи другою шкалою приладу, і занести результати у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Результати вимірів та розрахунків

Діелектрик	Виміряно					Обчислено		
	d , м	D , м	h , м	R_v , Ом	R_s , Ом	ρ_v , Ом·м	ρ_s , Ом	n , м ³

Етап 4. Вимірювання поверхневого опору зразків діелектриків

Вимірювання поверхневих опорів зразків твердих діелектриків проводити у такій послідовності:

- зібрати схему згідно з рис. 2.2;
- вимірити поверхневий опір R_s зразків, користуючись першою чи другою шкалою приладу, і занести результати у табл. 2.1.

Етап 5. Обробка експериментальних даних

Обробку експериментальних даних проводити у такій послідовності:

- розрахувати питомі об’ємні опори ρ_v зразків діелектриків за формулою (2.3) та результати розрахунків занести у табл.2.1;

- розрахувати питомі поверхневі опори ρ_s зразків діелектриків за формулою (2.4) та результати розрахунків занести у табл.2.1;
- визначити концентрацію вільних зарядів у зразках діелектриків за формулою (2.5) та результати розрахунків занести у табл.2.1;
- порівняти концентрації вільних зарядів у діелектриках і металах та зробити висновок щодо різниці їх питомих опорів;
- на підставі одержаних значень ρ_v і ρ_s зробити висновок про якість досліджених діелектриків.

Етап 6. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву, мету та програму роботи.
2. Схеми рис. 2.1 і 2.2.
3. Заповнену табл. 2.1.
4. Приклад розрахунку величин ρ_v , ρ_s , n .
5. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 1

Практично всі електроізоляційні матеріали (діелектрики) під дією електричної напруги пропускають деякий (звичайно дуже малий) струм, тобто не є ідеальними через наявність деякої електропровідності. Електропровідність твердих діелектриків пояснюється наявністю у них вільних електричних зарядів, що породжується в основному переміщенням слабо закріплених іонів випадкових домішок та іонів самого діелектрика (особливо при високих температурах). У деяких діелектриків електропровідність може бути викликана і присутністю вільних електронів. У твердих діелектриках вільні заряди можливі не тільки в їх об'ємах, а й в тонкому шарі вологи та різних забруднень на їх поверхні. Тому в твердих діелектриках розрізняють об'ємну та поверхневу електропровідності.

Для порівняння різних діелектриків з точки зору їх електропровідності використовують питому об'ємну γ_v та питому поверхневу γ_s електропровідності або питомий об'ємний ρ_v та питомий поверхневий ρ_s опори, які зворотні по відношенню до відповідних питомих електропровідностей. З курсу фізики відомо, що питома електропровідність γ залежить від концентрації вільних зарядів n , їх рухливості u і величини заряду q :

$$\gamma = q \cdot n \cdot u. \quad (2.1)$$

Рухливість вільних електронів при їх наявності в діелектрику суттєво не відрізняється від рухливості електронів у металах (для міді $u = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$,

$n=10^{28} \text{ м}^{-3}$). Отже, невелику електропровідність діелектриків можна пояснити тільки незначною концентрацією в них вільних зарядів.

Поверхнева провідність обумовлюється здатністю діелектрика адсорбувати на своїй поверхні вологу і пил, і тому вона залежить від стану поверхні самого діелектрика та властивостей навколишнього середовища. Поверхня неполярних діелектриків змочується та забруднюється меншою мірою порівняно з полярними. На гладкій і рівній поверхні діелектрика адсорбується менше води і забруднюючих речовин, і тому питомий поверхневий опір ρ_s такого діелектрика значно більший, ніж питомий поверхневий опір у того ж матеріалу з шершавою поверхнею.

При підвищенні температури діелектрика зростає рухливість його вільних зарядів (це стосується у першу чергу іонів) та їх концентрація завдяки тепловій дисоціації молекул. Це викликає ріст електропровідності та зменшення величини ρ_v . Електропровідність твердих діелектриків залежить також від величини діючої напруги. При високій напрузі частково руйнуються полярні молекули або вириваються електрони з атомів, що призводить до збільшення концентрації вільних зарядів і зростання електропровідності діелектрика. Електропровідність твердих діелектриків збільшується в разі їх зволоження, якщо вони мають гігроскопічну структуру.

Питомий об'ємний опір полярних твердих діелектриків звичайно нижчий, ніж у неполярних. Пояснюється це складністю очищення полярних діелектриків та легкістю руйнування їх молекул електричним полем.

За величинами питомого об'ємного ρ_v і питомого поверхневого ρ_s опору діелектрики умовно розподіляються на:

високоякісні –	$\rho_v=10^{13} \dots 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}, \rho_s=10^{14} \dots 10^{16} \text{ Ом};$
якісні –	$\rho_v=10^9 \dots 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}, \rho_s=10^{10} \dots 10^{13} \text{ Ом};$
задовільні –	$\rho_v=10^6 \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \rho_s=10^8 \dots 10^9 \text{ Ом}.$

До етапів 2, 3 і 4

Вимірювання опорів діелектриків необхідно проводити при постійній напрузі, оскільки при змінній напрузі додатково виникає зарядно-розрядний струм, викликаний поляризацією. За цієї причини показання приладу знімають не раніше ніж через 60с після подання постійної напруги, оскільки для завершення поляризації необхідний деякий час. Для того, щоб можна було відокреmlено зробити вимір об'ємного та поверхневого опорів, використовують три електроди, які називають вимірювальним електродом B , електродом напруги H та охоронним електродом O .

У схемі вмикання електродів для вимірювання об'ємного опору твердого діелектрика (рис. 2.1) струм електропровідності діелектрика, який йде від клеми (+) джерела живлення через електрод напруги H , розгалужується. Перша його частина i_v , яка проходить через вимірювальний електрод B і реєструється вимірювального приладом, залежить тільки від об'ємного опору R_v зразка діелектрика в середній його частині, де електричне поле однорідне. Друга частина

струму проходить через охоронний електрод O (кільце) на клему E (екран) вимірювального приладу і тому не реєструються цим приладом. Друга частина струму витікання має дві складові – об’ємний струм i'_v в крайніх областях зразка, де електричне поле неоднорідне, і поверхневий струм i_s . Завдяки такій схемі похибки незначні, оскільки друга частина струму ($i_s + i'_v$) відводиться від вимірювального електрода B . Якщо зняти охоронний електрод O із зразка, то замість струму об’ємної електропровідності i_v прилад почне вимірювати суму струмів об’ємної та поверхневої електропровідності, тобто покаже менше значення опору. Електрод O також забезпечує практично однорідне електричне поле в зразку поміж електродами B і H .

У схемі вмикання електродів для вимірювання поверхневого опору твердого діелектрика (рис. 2.2) роль охоронного електрода O виконує нижній електрод – він відводить повз ланцюга вимірювання струм об’ємної провідності i_v та зовнішній поверхневий струм i'_s . Поверхневий струм i_s , що протікає кільцевим проміжком між електродами B та H (кільце), вимірюється приладом і визначає розмір поверхневого опору R_s .

Для прямого вимірювання опорів діелектрика використовують електронні мегаомметри, тераомметри та мости постійного струму. Тераомметр Е6-13А, який є в лабораторії, призначений для вимірювання опору постійному струму в діапазоні від 10 до 10^{14} Ом. Основний елемент приладу – підсилювач постійного струму Π з великим коефіцієнтом підсилення, в пряме чи зворотне коло якого вмикається вимірювальний елемент з електричним опором R_x .

При вимірюванні опорів в діапазоні $10 \dots 10^6$ Ом застосовується схема, в якій джерело стабільної напруги ДСН та зразковий опір R_0 утворюють штучний генератор струму, а вимірювальний опір R_x вмикається в коло зворотного зв’язку (рис. 2.3).

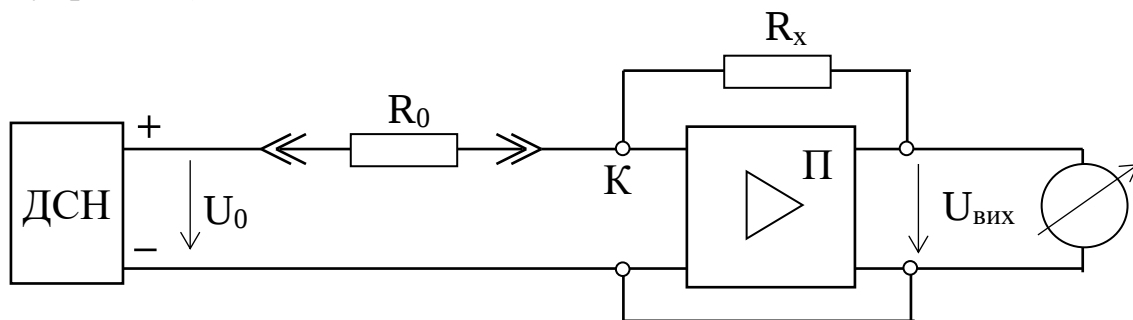


Рисунок 2.3 – Схема для вимірювання опорів в діапазоні $10 \dots 10^6$ Ом

У цій схемі джерело стабільної напруги ДСН та зразковий опір R_0 утворюють штучний генератор струму, а вимірювальний опір R_x вмикається в коло зворотного зв’язку. Вихідна напруга $U_{вих}$, виходячи із рівності струмів у точці K схеми, визначається із співвідношення:

$$\frac{U_0}{R_0} = \frac{U_{вих}}{R_x}. \quad (2.2)$$

Прилад у цьому випадку має пряму лінійну шкалу, тобто вихідна наруга прямо пропорційна вимірювальному опору.

При вимірюванні опорів у діапазоні $10^6 \dots 10^{14}$ Ом використовується схема рис. 2.4, де джерело стабільної наруги ДСН і вимірювальний опір R_x , що вмикається вже в пряме коло підсилювача Π , утворюють штучне джерело струму.

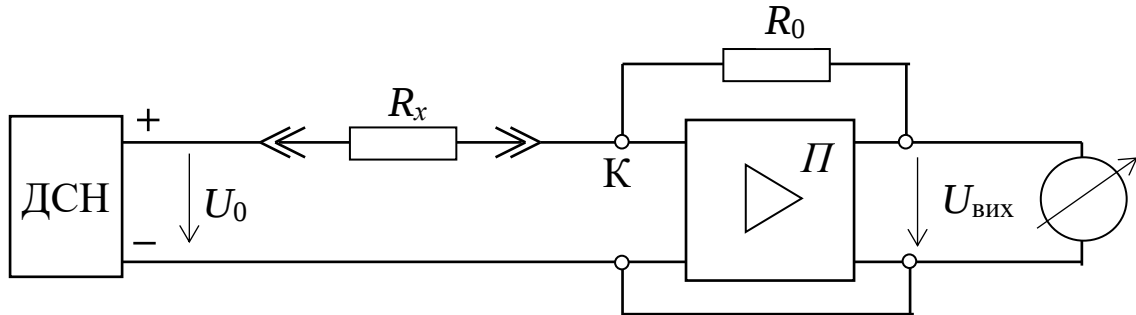


Рисунок 2.4 – Схема для вимірювання опорів у діапазоні (10^6 – 10^{14}) Ом

Зразковий опір R_0 в цьому випадку ввімкнений у коло зворотного зв'язку. Вихідна наруга $U_{\text{вих}}$, виходячи із рівності струмів у точці K схеми, визначається також із співвідношення:

$$\frac{U_0}{R_x} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_0}. \quad (2.3)$$

Шкала приладу в цьому випадку є зворотно пропорційною. У приладі використано декілька опорів R_0 для змінюють діапазону вимірювання. До комплекту приладу входить вимірювальна камера, що служить екраном. При вимірюванні досліджуваній зразок розміщують усередині камери, а саму камеру з'єднують з клемою “земля” приладу.

До етапу 5

Питомий об'ємний опір діелектрика ρ_v (Ом·м) визначається за формулою:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h}, \quad (2.4)$$

де R_v – об'ємний опір (результат вимірювання, табл. 2.1);

$S = \pi \cdot d^2 / 4$ – площа контактної поверхні вимірювального електрода В;

d – діаметр вимірювального електрода (результат вимірювання, табл. 2.1);

h – товщина зразка діелектрика (результат вимірювання, табл. 2.1).

Питомий поверхневий опір діелектрика ρ_s (Ом) визначається за формулою:

$$\rho_s = R_s \frac{L}{g}, \quad (2.5)$$

де R_s – поверхневий опір (результат вимірювання, табл. 2.1);

$L = \pi \cdot \frac{(D+d)}{2}$ – ефективний периметр вимірювального електрода B , з якого витікають поверхневі вільні заряди;

D – внутрішній діаметр електрода напруги H за схемою рис. 2.2 (результат вимірювання, табл. 2.1);

$g = \frac{(D-d)}{2}$ – відстань між вимірювальним електродом B і електродом напруги H , яку долають поверхневі вільні заряди.

Концентрацію вільних зарядів у зразках діелектриків можна визначити, виходячи з формули (2.1):

$$n = \frac{1}{\rho_v \cdot q \cdot u}, \quad (2.6)$$

де ρ_v – питомий об'ємний опір (результат розрахунків табл. 2.1);

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд іона чи електрона;

u – середня рухливість зарядів (оскільки в діелектриках вільні заряди – це в основному іони, то в розрахунках можна прийняти $u = 10^{-9}$ м²/В·с).

Контрольні запитання та завдання

1. Чому діелектрики мають ненульову електропровідність?
2. Які види електропровідності можливі в твердих діелектриках?
3. Якими параметрами характеризують діелектрики з точки зору їх електропровідності?
4. Від яких чинників залежить величина питомого об'ємного опору діелектриків?
5. Які чинники впливають на величину питомого поверхневого опору?
6. Чим пояснити різницю в значеннях ρ_v полярних і неполярних діелектриків?
7. За якої напруги (постійної чи змінної) необхідно вимірювати опір діелектриків і чому?
8. Чому при вимірюванні опорів діелектриків необхідна система з трьох електродів?
9. Намалюйте схему вмикання електродів для визначення питомого об'ємного опору та поясніть призначення кожного її елемента.
10. Намалюйте схему вмикання електродів для визначення питомого поверхневого опору та поясніть призначення кожного з її елементів.
11. Поясніть, як змінюється показання приладу при вимірюванні опору діелектрика, якщо вимкнути охоронний електрод.
12. Чому показання приладу при вимірюванні опору діелектриків треба фіксувати через деякий інтервал часу після подання напруги на електроди?
13. Поясніть принцип дії тераомметра.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТМ - 1/3

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ РІДИННИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи:

Вивчити механізм пробою рідинного діелектрика та виконати стандартне випробування трансформаторного масла на пробій електричним полем.

Програма роботи

1. Вивчення механізму пробою рідинного діелектрика.
2. Ознайомлення з діючими нормами електричної міцності та технічними засобами випробування на електричний пробій трансформаторного масла.
3. Проведення стандартного випробування на пробій трансформаторного масла електричним полем.
4. Обробка експериментальних даних.
5. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення механізму пробою рідинного діелектрика

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, вивчити механізм пробою діелектриків на прикладі трансформаторного масла. З'ясувати електричну міцність E_m як числову характеристику діелектрика протистояти електричному пробою та зберігати свої електроізоляційні властивості. Звернути увагу на механізм впливу домішок та температури на електричну міцність трансформаторного масла.

Етап 2. Ознайомлення з нормами електричної міцності та технічними засобами випробування на електричний пробій трансформаторного масла

Користуючись літературою та методичними вказівками до лабораторної роботи, ознайомитися з нормами електричної міцності трансформаторного масла, яке використовується у високовольтних маслонаповнених апаратах або трансформаторах. Ознайомитися з принципом роботи апарата АІІІ-70, призначеного для визначення електричної міцності ізоляції (рис.3.1). Звернути увагу на систему захисного блокування та сигналізації апарата.

Етап 3. Проведення стандартного випробування на пробій трансформаторного масла

Стандартне випробування на пробій трансформаторного масла необхідно проводити з допомогою апарата АИИ-70 у такій послідовності:

- пересвідчитись у відсутності напруги на апараті АИИ-70, увійти в огорожену частину лабораторії, надіти гумові боти та рукавиці;
- перевірити заземлення апарата? виставити ручку регулюючого автотрансформатора апарата в нульове положення (кінцеве положення при її обертанні проти стрілки годинника), перемикач захисту S2 встановити в положення “чутливий”;
- звернути увагу на те, щоб латунні електроди були повністю занурені в трансформаторне масло при стандартній відстані між ними $d=2,5\text{мм}$;
- закрити двері камери, стати на гумовий килимок і за участю іншого учасника роботи увімкнути розетку живлення “сітка”, після чого почне світити сигнальна зелена лампочка Л2;
- натиснути білу кнопку “Вкл.” (S1 на рис.3.1) автоматичного вимикача АВ, внаслідок чого на первинну обмотку високовольтного трансформатора ТЗ подається напруга і починає горіти червона сигнальна лампочка ЛЗ;
- повільним обертанням ручки автотрансформатора за напрямком руху стрілки годинника підвищувати напругу до пробою трансформаторного масла, яке супроводжується автоматичним вимиканням автомата і погасанням червоної сигнальної лампочки ЛЗ;
- визначити величину пробивної напруги за верхньою шкалою вольтметра апарата і занести результат у табл.3.1;
- обернути ручку регулюючого автотрансформатора в нульове положення і вимкнути апарат з електромережі;
- відкрити дверці на кришці апарата і обережно перемішати масло сухою скляною трубкою для вилучення із розрядного проміжку продуктів розпаду масла при пробіі (при перемішуванні не допускати виникнення в рідині пухирчиків повітря);
- зробити шість вимірів пробивної напруги з проміжками часу між пробоюми у 5 хвилин (за цей час продукти розкладання масла вилучаються з простору між електродами) та занести результати вимірів у табл.3.1.

Таблиця 3.1

Результати вимірів та розрахунків

Діелектрик	Виміряно						Обчислено		
	$U_{\text{пр1}},$ кВ	$U_{\text{пр2}},$ кВ	$U_{\text{пр3}},$ кВ	$U_{\text{пр4}},$ кВ	$U_{\text{пр5}},$ кВ	$U_{\text{пр6}},$ кВ	$U_{\text{пр}},$ кВ	$\Delta_m, \%$	$E_m,$ кВ/мм
Експлуатаційне трансформаторне масло									

Етап 4. Обробка експериментальних даних

Експериментальні данні, які отримані внаслідок стандартного випробування на електричний пробій трансформаторного масла, необхідно обробляти у такій послідовності:

– обчислити середнє арифметичне значення пробивної напруги $U_{\text{пр}}$, кВ:

$$U_{\text{пр}} = \frac{1}{5} \sum_{i=2}^6 U_{\text{пр}i}, \quad (3.1)$$

де $U_{\text{пр}i}$ - пробивна напруга i – го пробою, кВ;

– розрахувати максимальне відносне відхилення пробивної напруги від його середнього значення $U_{\text{пр}}$:

$$\Delta_{\text{м}} = \frac{\delta_{\text{макс}}}{U_{\text{пр}}} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

де $\delta_{\text{макс}}$ – максимальне абсолютне відхилення пробивної напруги від його середнього значення;

– якщо виявиться $\Delta_{\text{м}} > 15\%$, то провести 5 додаткових пробів трансформаторного масла та скоригувати середнє значення пробивної напруги $U_{\text{пр}}$ за формулою (3.1), виходячи з 10 пробів (замість 5 пробів);

– визначити та занести в табл.3.1 значення електричної міцності трансформаторного масла $E_{\text{м}}$, кВ/мм:

$$E_{\text{м}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d}, \quad (3.3)$$

де d - стандартна відстань між електродами ($d=2,5\text{мм}$);

– побудувати графік пробивної напруги як функцію номера досліду та пояснити причини розкиду її значень;

– зробити висновок щодо придатності випробуваного (“експлуатаційного”) масла на основі діючих норм електричної міцності (табл. 3.2).

Етап 5. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву, мету та програму роботи.
2. Принципову схему апарата АИИ-70 (рис. 3.1).
3. Заповнену табл. 3.1.
4. Розрахунки величин $U_{\text{пр}}$, $\Delta_{\text{м}}$ і $E_{\text{м}}$ за формулами (3.1 ... 3.3).
5. Графік пробивної напруги з поясненнями.
6. Висновок щодо придатності трансформаторного масла.

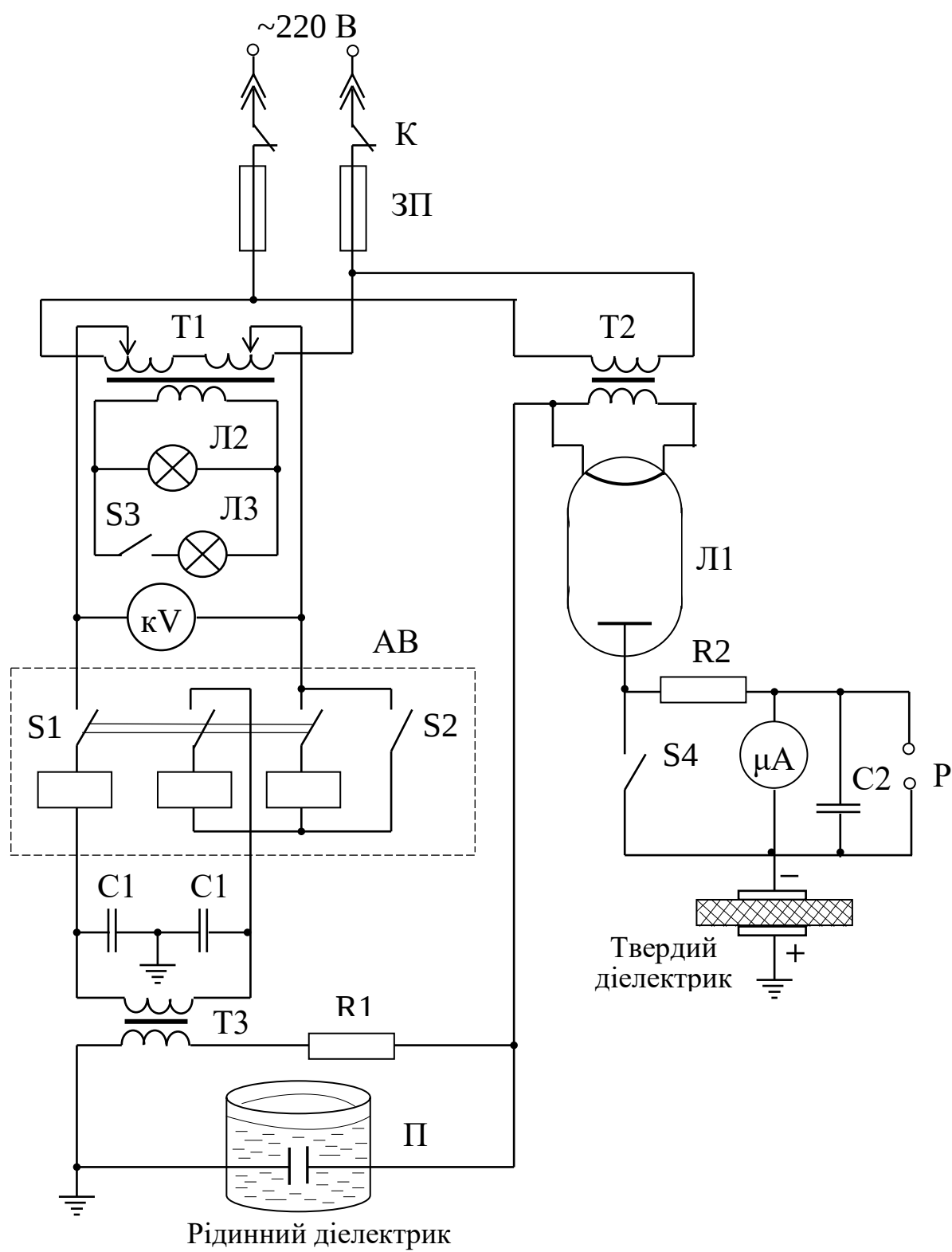


Рисунок 3.1 – Принципова схема апарата АИИ-70

До етапу 1

Пробій діелектрика електричним полем – це процес різкого зростання електричного струму через діелектрик під впливом сил електричного поля при високій електричній напрузі, внаслідок чого діелектрик втрачає свої електроізоляційні властивості. Здатність діелектрика протистояти пробою характеризують електричною міцністю E_m – середнім значенням електричної напруженості, при якій відбувається пробій діелектрика. Рідинні та газоподібні діелектрики на відміну від твердих діелектриків після пробою та вимкнення напруги відновлюють свої електроізоляційні властивості. Серед рідинних діелектриків широко використовується нафтове електроізоляційне масло – трансформаторне масло, яке окрім збільшення електричної міцності ізоляції сприяє охолодженню обмоток і магнітопроводу трансформатора, а також швидкому гасінню електричної дуги в масляних вимикачах.

Найбільш важливий чинник, який впливає на електричну міцність нафтових масел – це присутність домішок і особливо води, яка є в маслі у стані емульсії (у вигляді надзвичайно дрібних краплинок). Негативна дія вологи посилюється волокнистими домішками, які інтенсивно вбирають у себе воду і стають при цьому напівпровідними. Пробій рідинних діелектриків пояснюється тим, що полярні домішки (емульсійна вода, волокна, тверді частинки) орієнтуються в електричному полі вздовж його силових ліній, утворюючи простягнені ланцюжки. По таких ланцюжках протікає струм провідності, що викликає інтенсивне місцеве нагрівання діелектрика. При цьому опір діелектрика в таких місцях зменшується, величина струму збільшується, що зрештою призводить до випаровування та закипання рідини (води або масла). Між електродами, до яких прикладена напруга, утворюється газовий канал з більш низькою електричною міцністю, по якому і відбувається електричний пробій. Якщо рідинний діелектрик старанно очистити від домішок, то у цьому випадку пробій виникає внаслідок таких чинників:

- а) емісії електронів з поверхні катода;
- б) ударної іонізації вільними електронами молекул рідини;
- в) руйнування електричним полем молекул діелектрика;
- г) утворення пазирчиків газу внаслідок розкладення вуглеводневих молекул діелектрика під дією сильного електричного поля.

Необхідно зауважити, що ударна іонізація молекул рідини розпочинається при значно більшій напруженості електричного поля порівняно з газами, що пояснюється більшою густиною рідини і, як наслідок, меншою довжиною вільного пробігу електронів. Тому електрична міцність рідинних діелектриків значно перевищує електричну міцність газів.

Електрична міцність рідинних діелектриків збільшується при зменшенні часу дії напруги: чим більше домішок (особливо води та волокон), тим помітніше це збільшення. Пояснюється це тим, що із зменшенням часу дії напруги

($t \leq 10^{-3}$ с) домішки не встигають утворювати простягнених ланцюжків, по яких звичайно і розпочинається пробій.

Електрична міцність трансформаторного масла збільшується при підвищенні його температури. Це пояснюється переходом домішок води із стану емульсії в стан молекулярно-розчинений (в діапазоні температур 60...80°C, а при нагріванні масла вище 80°C починається випаровування його та домішок води і утворення газових пухирчиків, що знижує E_m).

При зберіганні, транспортуванні та експлуатації масла кількість вологи та домішок у ньому, як правило, збільшується, що знижує електричну міцність. Під час експлуатації апарата, наприклад, трансформатора, заповненого маслом, при дії електричного поля, підвищеної температури та кисню повітря масло старіє, тобто в ньому утворюються забруднюючі продукти (кислоти, смоли тощо). Через це масло поступово втрачає свою початкову електричну міцність. Зниження електроізоляційних властивостей масла може спричинити аварію в електричних установках. Тому для забезпечення нормальної роботи апаратури періодично, а також перед заливкою перевіряють якість масла і, в першу чергу, його електричну міцність.

До етапів 2,3 і 4

Величина електричної міцності трансформаторного масла державним стандартом не встановлюється, і це не випадково. Справа в тому, що електрична міцність масла – це параметр надто чутливий до зволоження та забруднення. Вода чи пил можуть легко потрапити в масло при його перевезенні, зберіганні, переливанні в недостатньо чисту тару. Зволожене масло матиме при випробуванні електричну міцність, нижчу порівняно з чистим, і якщо б значення E_m були встановлені державним стандартом, то таке масло доводилося б бракувати. У той же час зволожене масло можна легко висушити. При правильному сушінні та очищенні електрична міцність масла повністю відновлюється. Таким чином, $E_{пр}$ – не є бракувальний показником якості трансформаторного масла, але її треба старанно контролювати.

Згідно з правилами технічної експлуатації електроустаткування передбачені допустимі значення електричної міцності (табл. 3.2) для двох типів масла: а) “свіжого” – чистого і сухого масла, підготовленого до заливки в трансформатор чи інший апарат; б) “експлуатаційного”, яке знаходиться в експлуатації в маслonaповненому апараті.

Щоб забезпечити певний період роботи апарата без заміни в ньому масла, до свіжого масла згідно табл.3.2 ставляться більш високі вимоги.

Для випробування масла використовується апарат “АИИ-70” (рис.3.1) з найбільшою вихідною напругою 50 кВ при змінному струмі (діюче значення) і 70 кВ – при постійному. Апарат оснащений системою захисного блокування і сигналізації та має огорожу. Напруга від електричної мережі через блокуючі

Норми електричної міцності трансформаторного масла

Номинальна напруга маслonaповненого апарата або трансформатора, кВ	Електрична міцність масла E_m (не менше), кВ/мм	
	для “свіжого”	для “експлуатаційного”
До 15 включно	10	8
Від 15 до 35 включно	12	10
Від 60 до 220 включно	16	14
Від 330 і вище	20	18

контакти К і запобіжники ЗП підводиться до регулюючого автотрансформатора Т1, який служить для плавної зміни напруги, та до трансформатора Т2 – для розігріву кенотрона Л1. Вмикання високої напруги здійснюється натисканням кнопки S1 автоматичного вимикача АВ, що має три обмотки, дві з яких сполучені послідовно і ввімкнені в одну фазу, а третя – шунтується перемикачем захисту S2. Розімкнений стан цього перемикача відповідає захисту “чутливий” – автомат АВ спрацьовує при пробі діелектрика і вимикає з мережі високовольтний трансформатор Т3. Коли перемикач S2 замкнений, то захист – “грубий”. У цьому випадку автоматичний вимикач АВ залишається ввімкненим, якщо потужність на боці високої напруги при 50 кВ не перевищує 2 кВА. Такий режим не повинен тривати більше хвилини. Вимірювання напруги, прикладеної до діелектрика, проводиться вольтметром кВ на боці низької напруги, який проградуєований відповідно до напруги на виході трансформатора Т3 (у кВ).

Конденсатори С1 служать для захисту від перенапруги первинної обмотки трансформатора Т3. Резистор R1 захищає трансформатор Т3 і кенотрон Л від перевантаження струмом при пробі діелектрика. Зелена лампочка Л2 сигналізує про подачу напруги на апарат, червона Л3 – про включення високовольтного трансформатора.

В установці є посудина П з електродами, куди заливають рідинний діелектрик. Доступ до посудини – через дверці на кришці пульта управління установкою. У посудину П вмонтовані два електроди - латунні диски діаметром 25 мм із заокругленими кінцями. Стандартна відстань між електродами – 2,5 мм, рівень масла повинен бути вищим кінця електродів не менше ніж на 15 мм.

Висновок щодо якості трансформаторного масла як електроізоляційного матеріалу та придатності його використання у високовольтних апаратах і трансформаторах можна робити тільки після декількох пробів (не менше шести) та усереднення експериментальних даних, враховуючи випадковий характер пробою, відповідно до діючих правил технічної експлуатації електроустаткування.

Тверді діелектрики випробовують на постійному (випрямленому) струмі. Випрямлення струму здійснюється з використанням кенотрона Л1 за однопівперіодною схемою. Якщо при цьому потрібно вимірювати струм діелектрика,

то для цього використовують мікроамперметр μA в анодному ланцюзі кенотрона. Захист мікроамперметра від перевантаження здійснюється за допомогою шунтуючого конденсатора $C2$, резистора $R2$ та розрядника P . Мікроамперметр має декілька границь вимірювання.

Контрольні запитання

1. Як використовують трансформаторне масло і з якою метою?
2. Яку властивість діелектрика характеризує електрична міцність?
3. Як відбувається пробій технічно чистих рідинних діелектриків?
4. У чому полягає механізм пробою очищених рідин?
5. Чому зменшується електрична міцність масла при наявності в ньому води та інших домішок?
6. Поясніть залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури та тривалості прикладення напруги.
7. Чому змінюється електрична міцність масла в період його експлуатації?
8. Поясніть суть процесу старіння трансформаторного масла.
9. Чому така важлива характеристика трансформаторного масла як його електрична міцність не стандартизована?
10. Які типи масел відрізняють при нормуванні електричної міцності?
11. Чому, згідно з діючими нормами, електрична міцність свіжого масла повинна бути вищою порівняно з експлуатаційним?
12. Поясніть призначення всіх елементів апарата “АИИ-70”.
13. Яким чином апарат фіксує момент пробою діелектрика?
14. Які заходи безпеки передбачені при роботі з апаратом “АИИ-70”?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕТМ - 1/4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи:

Визначити основні параметри процесу поляризації діелектриків у електричному полі – діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат.

Програма роботи

1. Вивчити механізм поляризації діелектриків у електричному полі.
2. Ознайомитись з принципом дії та конструкцією моста змінного струму.

3. Експериментально визначити параметри процесу поляризації діелектриків.
4. Обробка експериментальних даних.
5. Складання звіту.

Етапи виконання роботи

Етап 1. Вивчення механізму поляризації діелектриків в електричному полі

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, вивчити механізм та основні види поляризації діелектриків. З'ясувати сутність діелектричної проникності ϵ_r і тангенсу кута діелектричних втрат $\tan \delta$ як числових характеристик (параметрів) процесу поляризації діелектриків. Звернути увагу на те, яким чином ці параметри впливають на процес накопичення енергії і втрати енергії в діелектрику під впливом електричного поля. Ознайомитись з еквівалентними схемами та векторними діаграмами конденсатора з досліджуваним діелектриком (рис.4.1).

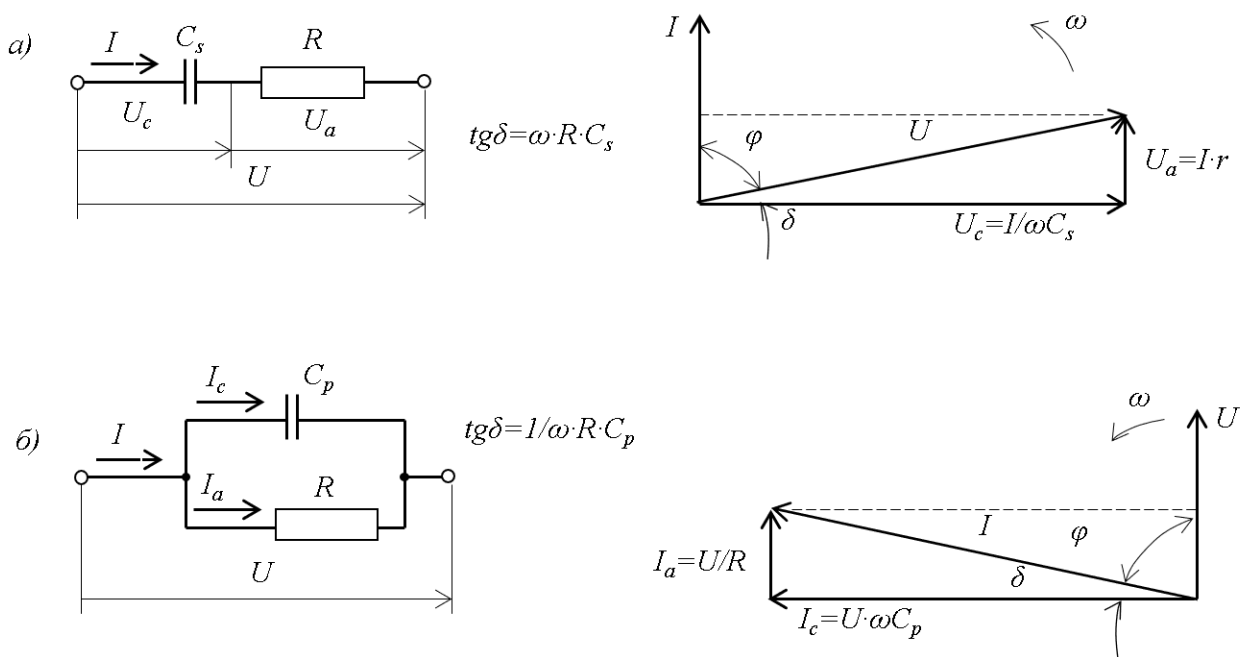


Рисунок 4.1 – Послідовна (а) і паралельна (б) еквівалентні схеми та векторні діаграми конденсатора з діелектриком відповідно

Етап 2. Ознайомлення з принципом дії та конструкцією моста з мінного струму

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної лабораторної роботи, вивчити принцип роботи моста змінного струму (рис. 4.2) та ознайомитись з методикою визначення відносної діелектричної

проникності ε_r та тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ діелектриків. Звернути особливу увагу на умови та способи досягнення рівноваги моста. З'ясувати призначення кожного із елементів моста та порядок регулювання для досягнення рівноваги моста.

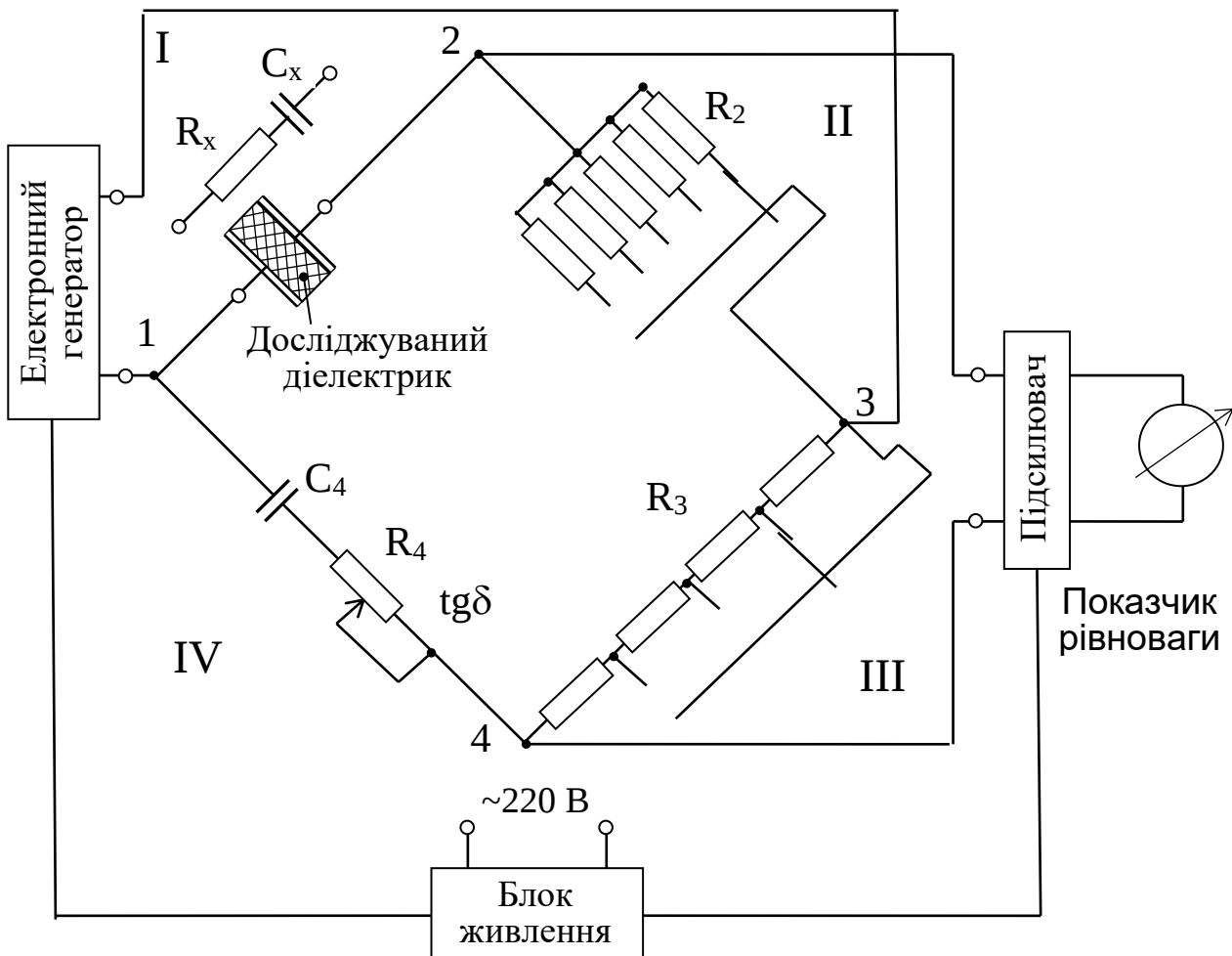


Рисунок 4.2 – Принципова схема моста змінного струму

Етап 3. Експериментальне визначення параметрів процесу поляризації діелектриків

Вимірювання параметрів процесу поляризації діелектриків (ємності конденсатора C_x з досліджуваним діелектриком і тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$) виконувати у такій послідовності:

- утворити конденсатор з досліджуваним діелектриком, розмістивши діелектрик між двома плоскими електродами (поверхня зразка діелектрика повинна бути рівною, гладенькою, без тріщин та подряпин і мати бажано круглу форму відповідно до форми електродів, а відношення діаметра зразка до його товщини повинне бути не меншим 10);

- виміряти діаметр електродів d і, користуючись мікрометром, товщину h наданих зразків та результати вимірювань занести у табл. 4.1;

– вимірити ємність плоского конденсатора C_x з різними діелектриками і тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ (кількість зразків вказує викладач) та результати вимірювань занести у табл.4.1.

Таблиця 4.1

Результати визначення параметрів процесу поляризації діелектриків

Діелектрик	Виміряно				Обчислено		
	C_x	$\operatorname{tg} \delta$	h	d	C_0	ϵ_r	P
	мкФ	–	м	м	мкФ	–	мкВт

Етап 4. Обробка експериментальних даних

Експериментальні данні необхідно обробляти у такій послідовності:

– розрахувати для всіх дослідів ємність C_0 вакуумного конденсатора, відстань між пластинами якого дорівнює товщині діелектрика, за формулою (4.2), та отримані результати занести у табл. 4.1;

– обчислити відносну діелектричну проникність досліджуваних діелектриків за формулою (4.1) і також занести результати у табл. 4.1;

– обчислити за формулою (4.4) діелектричні втрати P (активну потужність конденсатора з діелектриком) у досліджуваних діелектриках для умов їх роботи з напругою $U = 1000 \text{ В}$ і частотою $f = 50 \text{ Гц}$ та отримані результати занести у табл. 4.1;

– на підставі значень ϵ_r і $\operatorname{tg} \delta$ зробити висновок відносно механізмів поляризації в кожному із досліджуваних діелектриків та пояснити, якими фізичними процесами обумовлені втрати потужності в них.

Етап 5. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву, мету та програму роботи.
2. Принципову схему моста змінного струму (рис. 4.2).
3. Заповнену табл. 4.1.
4. Приклади розрахунків величин C_0 , ϵ_r і P
6. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 1

Процес поляризації діелектрика – це обмежене зміщення зв’язаних зарядів діелектрика або орієнтація дипольних молекул під впливом електричного поля (внаслідок дії сил Кулона). Зокрема, поляризація діелектрика в конденсаторі

сприяє додатковому накопиченню зарядів, тобто збільшенню його ємності C . Здатність діелектрика до поляризації характеризується відносною діелектричною проникністю ϵ_r , яка може бути визначена за збільшенням ємності конденсатора при заміні вакууму чи повітря між його пластинами цим діелектриком, тобто

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}, \quad (4.1)$$

де ϵ_r - відносна діелектрична проникність діелектрика;

C_x - ємність конденсатора з діелектриком;

C_0 - ємність вакуумного конденсатора (без діелектрика), розміри якого співпадають з розмірами конденсатора з досліджуваним діелектриком.

Для визначення параметрів процесу поляризації діелектриків зручніше і простіше користуватися плоским конденсатором, ємність C_0 якого можна визначити за формулою:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{h} \cdot 10^6, \text{ мкФ}, \quad (4.2)$$

де $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа обкладинки конденсатора, м²;

h – відстань між паралельними обкладинками конденсатора (товщина діелектрика), м;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – абсолютна діелектрична проникність вакууму, Ф/м.

Значення діелектричної проникності матеріалу використовується при виборі діелектрика для конденсаторів, при виборі ізоляції височастотних кабелів зв'язку або при розрахунку напруженості електричних полів у діелектриках.

Поляризація діелектриків має декілька видів. Основні з них такі:

Електронна поляризація - це пружне зміщення орбіт електронів відносно ядер атомів або деформація цих орбіт при дії на діелектрик електричного поля. Вона відбувається за надзвичайно короткий термін – близько 10^{-15} с. Електронна поляризація має місце у всіх видах діелектриків незалежно від наявності інших видів поляризації. Втрат енергії за повний період дії поля не спостерігається. З підвищенням температури ϵ_r при електронній поляризації зменшується в зв'язку з тепловим розширенням діелектрика і зменшенням через це кількості атомів або молекул в одиниці об'єму. Для твердих та рідинних діелектриків ϵ_r при електронній поляризації може бути в межах 1,8...2,5.

Іонна поляризація – це пружне взаємне зміщення іонів діелектрика під впливом електричного поля. Вона характерна для твердих тіл з іонною будовою і протікає дещо повільніше порівняно з електронною (через більшу масу іонів) – приблизно за 10^{-13} с. Електрична енергія, яка потрібна для зміщення іонів, повністю повертається до джерела живлення після зняття напруги, тобто іонна поляризація також відбувається без втрат енергії поля в діелектрику.

Величина поляризації з підвищенням температури зростає в результаті зменшення пружних сил, що діють між іонами, оскільки відстань між іонами при тепловому розширенні збільшується. У діелектриках з іонною поляризацією $\epsilon_r = 3 \dots 15$.

Дипольна поляризація – це поворот або орієнтація дипольних молекул діелектрика електричним полем. Вона характерна для полярних діелектриків і належить до уповільнених видів поляризації – час її реалізації значно більший порівняно з іонною – $10^{-2} \dots 10^{-10}$ с. Поворот дипольних молекул під дією електричного поля потребує подолання сил внутрішнього “тертя” в речовині, що зв’язане з втратою електричної енергії, яка розсіюється в діелектрику у вигляді тепла. Діелектрична проникність полярних діелектриків ϵ_r може бути в діапазоні від 3 до 10 і помітно залежить від їх температури та частоти зміни поля. Зокрема, при низьких температурах, коли речовина має велику в’язкість, орієнтація молекул утруднена, і тому поляризація слабка. При підвищенні температури в’язкість зменшується, орієнтація молекул зростає, завдяки чому ϵ_r суттєво збільшується. При ще більш високих температурах через посилення хаотичних теплових коливань молекул їх орієнтація полем знижується, тому ϵ_r , пройшовши через максимум, зменшується. При зростанні частоти напруги, прикладеної до діелектрика до $10^2 \dots 10^{10}$ Гц диполі не встигають орієнтуватися в напрямку дії поля, що зменшує ϵ_r .

Спонтанна поляризація є тільки в групі твердих іонних діелектриків (сегнетоелектриках), що мають доменну структуру (подібну феромагнетикам). У межах макроскопічних областей (доменів) різнойменно заряджені частинки відповідно взаємно орієнтуються у відсутності зовнішнього поля, утворюючи диполі. Дія зовнішнього поля сприяє переважній орієнтації електричних моментів доменів як диполів по напрямку поля, що утворює ефект дуже сильної поляризації – ϵ_r може перевищувати значення 50000. Спонтанна поляризація супроводжується значним розсіюванням енергії в діелектрику і, як наслідок, його нагріванням. Діелектрична проникність залежить від напруженості електричного поля та температури діелектрика нелінійно (з максимумом).

Розсіювання енергії в діелектрику, характеризується її потужністю – діелектричними втратами, які виникають внаслідок:

- наскрізної електропровідності (струму витоку);
- орієнтації дипольних молекул у полярних діелектриках та орієнтації електричних моментів доменів у сегнетоелектриках;
- перерозподілу зарядів у діелектриках, викликаного неоднорідністю їх структури;
- іонізації газових включень в твердому діелектрику.

При змінній напрузі можливі всі види діелектричних втрат, а при постійній – тільки перший та останній.

Діелектрик у електричному полі – це по суті конденсатор з діелектриком, в якому є втрати енергії. Він може бути зображений за допомогою еквівалентних схем: послідовної (рис. 4.1, а) чи паралельної (рис. 4.1, б). Величина

активного опору в схемах вибирається такою, щоб його потужність дорівнювала втратам у діелектрику конденсатора.

Внаслідок діелектричних втрат змінний (синусоїдальний) струм у реальному конденсаторі випереджає напругу за фазою на кут φ , менший за 90° , тобто $\varphi = 90^\circ - \delta$, де δ – кут діелектричних втрат. Для паралельної схеми (рис. 4.1,б):

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{R \cdot \omega \cdot C}, \quad (4.3)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;

I_a – активна складова струму конденсатора, А;

I_c – реактивна складова струму конденсатора, А;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота напруги на обкладинках конденсатора, 1/с;

f – частота напруги на обкладинках конденсатора, Гц;

R – величина активного опору еквівалентної схеми конденсатора, Ом;

C – ємність конденсатора, Ф.

Активну потужність конденсатора (діелектричні втрати) з урахуванням (4.3) можна записати як:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi = \frac{U^2}{R} = U^2 \cdot \omega \cdot C_x \cdot \operatorname{tg} \delta, \text{ мкВт}, \quad (4.4)$$

де U – прикладена до діелектрика напруга, В;

$R = \frac{1}{\omega C \cdot \operatorname{tg} \delta}$ – з формули (4.3);

C_x – ємність конденсатора з діелектриком, мкФ (табл.4.1);

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат (табл.4.1).

Неполярні, однорідні за структурою діелектрики (поліетилен, фторопласт-4) мають $\operatorname{tg} \delta = (2 \dots 5) \cdot 10^{-4}$. Матеріали з малим значенням $\operatorname{tg} \delta$ особливо необхідні у високочастотній техніці та при великих напругах, тому діелектрики з $\operatorname{tg} \delta \leq 5 \cdot 10^{-4}$ називають іноді високочастотними. Величина $\operatorname{tg} \delta$, як і інші параметри діелектриків, не залишається постійною. Вона залежить від різних зовнішніх чинників – температури, напруги та її частоти, вологості тощо.

До етапу 2

Вимірювання ємності конденсатора, між обкладинками якого розміщено досліджуваний діелектрик (для знаходження ϵ_r), та тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ на частотах вище 400 Гц виконують за допомогою мостів змінного струму. У лабораторії використовується міст типу Р-577 (рис. 4.2).

У ліве верхнє плече I моста вмикається конденсатор C_x з діелектриком. Праве верхнє плече II та праве нижнє плече IV складається з кількох регулюючих резисторів R_2 і R_3 . Ліве нижнє плече IV містить у собі конденсатор C_4 та регулюючий резистор R_4 , який градуйований в значеннях $tg\delta$.

Рівновага моста досягається регулюванням резисторів за відсутністю напруги між точками 2 і 4 (рис. 4.2.) при максимально можливому значенні коефіцієнта підсилення підсилювача. Умовою рівноваги моста є рівність добутків повних (комплексних) опорів протилежних плечей моста:

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4 \quad (4.5)$$

$$(R_x + j \cdot \omega \cdot C_x) \cdot R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_4} \right) \cdot R_2. \quad (4.6)$$

Прирівнюючи між собою дійсні та уявні частини добутків рівняння (4.6), одержимо дві умови рівноваги мосту:

$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_2}, \quad R_x = R_4 \frac{R_2}{R_3}. \quad (4.7)$$

Перемножуючи між собою рівності (4.7) і помножуючи їх на ω , одержимо:

$$\omega \cdot R_4 \cdot C_4 = \omega \cdot R_x \cdot C_x = tg\delta, \quad (4.8)$$

як це слідує із формули на рис.4.1, а.

Живлення вимірювального мосту (точки 1 і 3, рис. 4.2) здійснюється від внутрішнього електронного генератора, робоча частота якого 1000 Гц. У вимірювальну діагональ (точки 2 і 4, рис. 4.2) через підсилювач змінного струму ввімкнений показчик рівноваги.

Контрольні запитання

1. Яку властивість діелектриків характеризує їх діелектрична проникність?
2. Чому відбувається збільшення ємності конденсатора (порівняно з вакуумним чи повітряним) при розміщенні діелектрика між його обкладинками?
3. Назвіть основні види поляризації та їх особливості.
4. Як залежить діелектрична проникність неполярних діелектриків від температури і частоти прикладеної напруги і чому?
5. Дайте характеристику залежності діелектричної проникності полярних діелектриків від температури і частоти прикладеної напруги.
6. Опишіть метод визначення діелектричної проникності.
7. Яку властивість характеризує тангенс кута діелектричних втрат?

8. За якої напруги втрати в діелектрику будуть більшими - за постійної чи змінної - і чому?

9. Чому відрізняються значення $tg\delta$ полярних і неполярних діелектриків?

10. Поясніть залежності ϵ_r і $tg\delta$ полярних діелектриків від температури.

11. Поясніть залежності ϵ_r і $tg\delta$ неполярних діелектриків від температури.

12. Напишіть формули для розрахунку втрат потужності в діелектриках.

13. Поясніть принцип дії та умови рівноваги моста змінного струму.

14. Поясніть практичне використання величин ϵ_r і $tg\delta$.

СПИСОК ОСНОВНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електротехнічні матеріали: навч. посіб. / А.С. Головченко, Д.В. Ципленков, А.А. Колб, А.В. Ніколенко; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ "ДП", 2021. – 184 с.
2. Журавльова Л.В., Бондар В.М. Електроматеріалознавство: Підручник. – К.: Грамота, 2006. – 312 с.
3. Василенко І.І., Широков В.В. Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали. Навч. Посібн. – Львів. «Магнолія-2006». 2018. – 242 с.
4. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник / В. О. Леонт'єв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 122 с.
5. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник / В. О. Леонт'єв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 122 с.
6. Конструкційні та функціональні матеріали/ Бабак В.П., Байса Д.Ф.. У двох частинах. – К. Техніка. Ч1. 2003 – 344 с.; Ч2 – 368 с.
7. Електроматеріалознавство /Колесов С.Н., Колесов І.С./ –Київ: Дельта, 2008. – 512 с.
8. Bartnikas R. (1994) Electrical Insulating Liquids. Philadelphia – 462 p.
9. 14. Hari Singh Nalwa (1999). Handbook of Low and High Dielectric Constant Materials and Their Applications: Materials and processing. Academic Press. – 1100 p.
10. 15. Helerea E., Calin M. (2015). Materials In Electrical Engineering. Publishing House Transilvania University Brasov, Romania, — 378 p.

СПИСОК ДОДАТКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колесов С.Н., Колесов И.С. Электротехнические и конструкционные материалы: Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей. – К.: Транспорт Украины, 2002. - 384 с.
2. Электрорадиоматериалы/ Под ред. Б.М. Тареева. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.
3. Материалы микроэлектронной техники/ Под ред. В.М.Андреева. – М.: Радио и связь, 1989. - 352 с.
4. Казарновский Д.М., Тареев Б.М. Испытание электроизоляционных материалов. 3-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1980. – 214 с.
5. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. – М.: Высш. шк., 1981. – 335 с.
6. Курносоев А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. - М.: Высш. шк., 1975. – 342 с.
7. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах/ Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.; 1987. – 464 с.; 1988. – 728 с.

З М І С Т

Вступ	3
Правила техніки безпеки під час роботи в лабораторії	3
Лабораторна робота ЕТМ - 1/1 Вивчення властивостей електроізоляційних матеріалів	5
Лабораторна робота ЕТМ - 1/2 Визначення об'ємного та поверхневого питомих опорів твердих діелектриків	14
Лабораторна робота ЕТМ - 1/3 Визначення електричної міцності рідинних діелектриків	22
Лабораторна робота ЕТМ – 1/4 Дослідження поляризації діелектриків	29
Список основної літератури	38
Список додаткової літератури	38

Упорядники:

Ципленков Дмитро Володимирович
Гребенюк Андрій Миколаєвич
Бобров Олексій Володимирович
Колб Андрій Антонович
Лябагова Тетяна Валеріївна

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни:
«Електротехнічні матеріали» (Розділ “Діелектричні матеріали”)
для студентів спеціальності: 141 - Електроенергетика, електротех-
ніка та електромеханіка

Національний гірничий університет
49027, м. Дніпропетровськ-27, просп. Д. Яворницького, 19.