

ЕТМ-1

**Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
*Кафедра електротехніки***



**МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
лабораторних робіт ЕТМ-1 з дисципліни**

"Електроматеріалознавство"

**Дніпро
НТУ «ДП»
2020**

Матеріали методичного забезпечення лабораторних робіт ЕТМ-1 з дисципліни “Електроматеріалознавство” Упорядн.: А.А. Колб, О.В. Бобров, Т.В. Лябагова. – Дніпро: Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, 2020.- 34 с.

Упорядники:

Колб Андрій Антонович, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки,
Бобров Олексій Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки,
Лябагова Тетяна Валеріївна, асистент кафедри електротехніки

Затверджено на засіданні кафедри електротехніки
(протокол № від 2020 р.)

Матеріали написані на основі багаторічного досвіду, накопиченого на кафедрі електротехніки при викладанні дисциплін “Електротехнічні матеріали”, “Електроматеріалознавство”, “Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка”, “Теоретичні основи електротехніки. Спецрозділи” та суміжних з ними дисциплін.

Друкується в редакційній обробці упорядників.

Відповідальний за випуск Д.В. Ципленков, завідувач кафедри електротехніки, канд. техн. наук, доцент.

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

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.

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.

3. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву і мету роботи.
2. Заповнену табл. 1.2.

Таблиця 1.1

Електроізоляційні матеріали

1	2	3	4	5	6
Міканіт	Слюда	Мікастрічка	Скломікастрічка	Скло	Колекторний міканіт
Електро-картон	Полівінілхлорид	Плівкоелектро-картон	Полістірол	Гетинакс	Поліетилен
Текстоліт	Каніфоль	Шелак	Гума	Епоксидна смола	Поліамідна смола
Поліетилен	Склотекстоліт	Фторопласт-4	Слюда	Кабельний папір	Каніфоль
Гетинакс	Бітум	Конденсаторний папір	Каніфоль	Фторопласт-4	Полівінілхлорид
Лакотканина	Фарфор	Пластикат із полівінілхлориду	Політетрафторетилен	Склотекстоліт	Текстоліт
Гума	Полістірол	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, вологостійкість, радіаційна стійкість)	Клас нагрівостійкості та допустима робоча температура	Сфера застосування
			ϵ_r - відносна діелектрична проникність	ρ_v - питомий об'ємний опір, Ом·м	$\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втраг	E_m - електрична міцність, 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 опроміюванні 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

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 витяжці з розплавів утворювати тонкі та міцні волокна, з яких можна виготовляти текстильні матеріали і плівки. Розгалужені та сітчасті полімери нездатні утворювати плівок 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-смолоносіїв (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.

Сполучне – 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 уведення 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: $\rho_v=10^{13}\dots10^{15}$ Ом·м; $\epsilon_r=2,3\dots2,4$; $\text{tg}\delta=(1\dots5)\cdot10^{-4}$; $E_m=15\dots20$ 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 $(2,1\dots2,3)\cdot10^3$ кг/м³. Матеріал порівняно м'який, має схильність до плинності в холодному стані, неполярний. За електроізоляційними властивостями фторопласт-4 є одним з найкращих діелектриків: $\rho_v=10^{15}\dots10^{16}$ Ом·м; $\epsilon_r=1,9\dots2,1$; $\text{tg}\delta=(1\dots3)\cdot10^{-4}$; $E_m=20\dots30$ 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: $\rho_v = 10^{13} \dots 10^{14}$ Ом·м; $\epsilon_r = 3,2 \dots 3,6$; $\text{tg}\delta = 0,03 \dots 0,08$; $E_m = 15 \dots 20$ кВ/мм, нагрівостійкість $+90^\circ\text{C}$. Використовують для виготовлення акумуляторних баків, ізоляційних трубок тощо. Пластифікований ПВХ називають полівінілхлоридним пластикатом 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 $\dots -\text{CO}-\text{N}-\text{CO}-\dots$ 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 кріогенних 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 $(1,28 \dots 1,48) \cdot 10^3$ кг/м³; $\rho_v = 10^{15} \dots 10^{16}$ Ом·м; $\epsilon_r = 3,5$; $\text{tg}\delta = (6 \dots 16) \cdot 10^{-4}$; $E_m = 160 \dots 200$ кВ/мм; межа міцності при розтягуванні $160 \dots 180$ МПа. З поліімідів виробляють плівки, які використовують у конденсаторах, нагрівостійких кабельних виробках, ізоляції електричних машин, а також лаки для покриття проводів та просочення невеликих катушок.

Термореактивні полімери

Фенолформальдегідні (бакелітові) смоли є продуктами поліконденсації фенолу $\text{C}_6\text{H}_5\text{—OH}$ 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 $55\ldots 80^\circ\text{C}$, розчиняється у спирті та ацетоні. При нагріванні до температури $100\ldots 140^\circ\text{C}$ бакеліт твердішає і переходить у проміжну стадію В – резитол, який не розчиняється, але набухає в розчиннику. Якщо нагрівання продовжити до $2\ldots 4$ 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: $\rho_v = 10^{11}\ldots 10^{12}$ Ом·м; $\epsilon_r = 5,0\ldots 6,5$; $\text{tg}\delta = 0,01\ldots 0,1$; $E_m = 10\ldots 20$ 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: $\rho_v = 10^8\ldots 10^{11}$ Ом·м; $\epsilon_r = 5\ldots 6$; $\text{tg}\delta = 0,03\ldots 0,4$; $E_m = 20\ldots 40$ 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: $\rho_v=10^8...10^{10}$ Ом·м; $\epsilon_r=5...6,5$; $\text{tg}\delta=0,06...0,8$; $E_m=4,5...16$ 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...3 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	$\text{tg}\delta$		E_m , кВ/мм
				при $f=50$ Гц	при $f=1$ МГц	
Мусковіт	$10^{12}-10^{16}$	$10^{11}-10^{12}$	6,8-7,2	0,015	0,0003	до 200
Флогопіт	10^{12}	$10^{10}-10^{14}$	6,0-6,2	0,05	0,0015	до 100

Слюда належить до матеріалів з високою нагрівостійкістю (+550...900°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: $\rho_v=10^{10}...10^{12}$ Ом·м; $\text{tg}\delta=0,05$; $E_m=15...60$ 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 та завдання

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 - 1/3

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

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.

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 АИИ-70, призначеного для визначення електричної міцності ізоляції (рис.3.1). Звернути увагу на систему захисного блокування та сигналізації апарата.

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 Л3;
- 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 Л3;
- 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 трубочкою для вилучення із розрядного проміжку продуктів розпаду масла при пробі (при перемішуванні не допускати виникнення в рідині пазирчиків повітря);
- зробити шість вимірів пробивної напруги з проміжками часу між пробоями 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	$\Delta_{\text{м}},$ %	$E_{\text{м}},$ кВ/мм
Експлуатаційне трансформаторне масло									

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 $U_{пр}$, кВ:

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

де $U_{прі}$ - пробивна напруга i – го пробою, кВ;

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

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

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

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

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

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

де d - стандартна відстань між електродами ($d=2,5$ 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).

5. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

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

Методичні вказівки

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.

Таблиця 3.2

Норми електричної міцності трансформаторного масла

Номінальна напруга маслонаповненого 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

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 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.

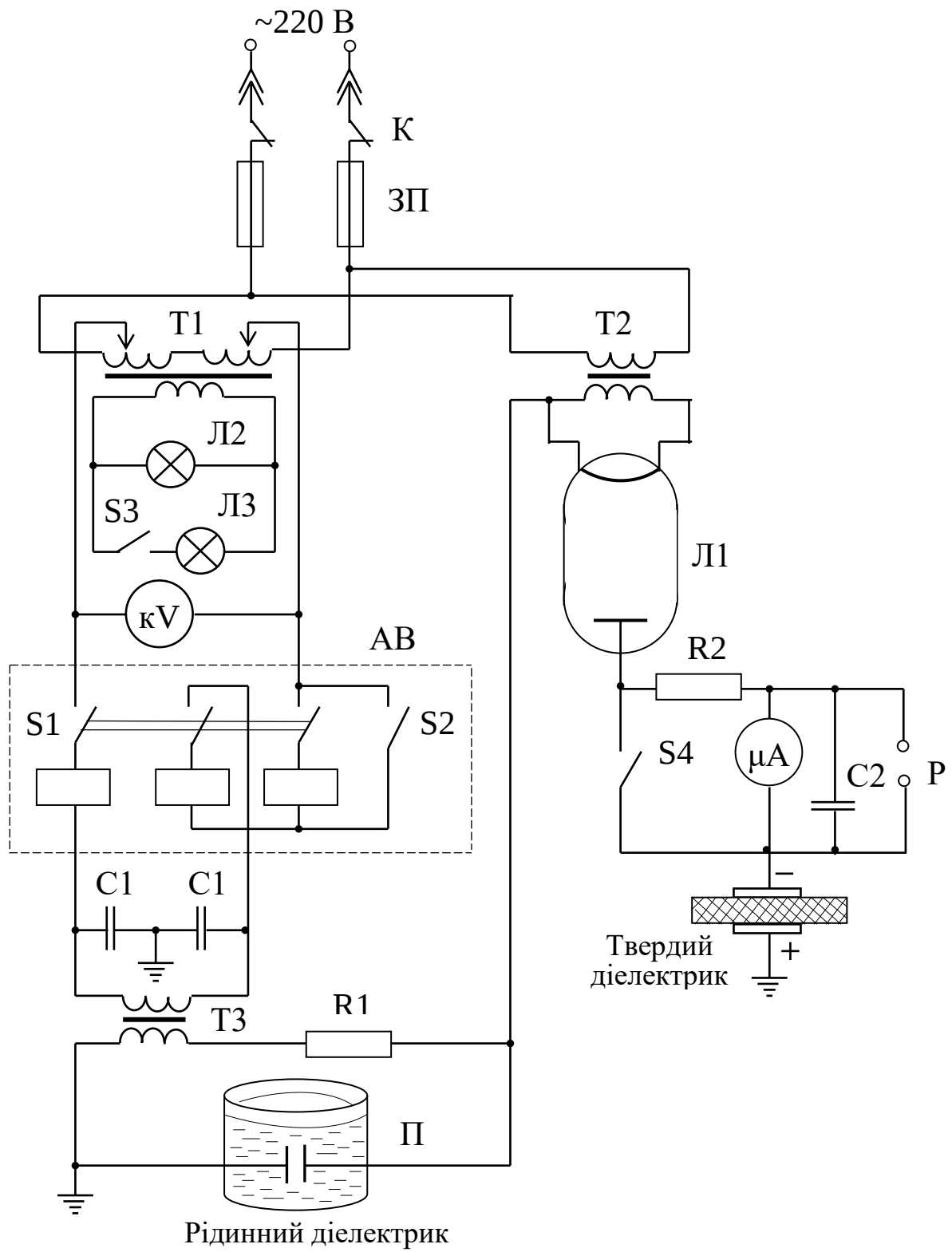


Рис. 3.1. Принципова схема апарата АИИ-70

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 С2, резистора R2 та розрядника Р. Мікроамперметр має декілька границь вимірювання.

Контрольні запитання та завдання

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 - 2/1

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи

Ознайомлення зі зразками, вивчення властивостей та сфер застосування магнітних матеріалів, перелік яких пропонує викладач.

Програма роботи

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

Етапи виконання роботи

1. Вивчення зразків магнітних матеріалів за їх зовнішніми ознаками

Ознайомитись зі зразками магнітних матеріалів, що є в лабораторії. Звернути увагу на структуру зразків магнітних матеріалів, їх колір, твердість, форму, будову поверхні та інші ознаки, за якими можна визначитись з назвами матеріалів та їх походженням.

2. Вивчення властивості та галузі застосування магнітних матеріалів

Основні властивості, характеристики, сфери застосування магнітних матеріалів та початкові матеріали для їх виготовлення, необхідно описати за формою таблиці 1.1, користуючись методичними вказівками до даної роботи та рекомендованою літературою.

3. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Назву і мету роботи.
2. Заповнену табл. 2.1.

Методичні вказівки

До етапів 1, 2 і 3

Загальні відомості про магнітні властивості феромагнетиків

В якості магнітних матеріалів використовують феромагнітні речовини (феромагнетики) та феромагнітні хімічні сполуки (ферити). Явище феромагнетизму пов'язане із спонтанним утворенням в деяких металах (Fe, Ni, Co) макроскопічних областей - магнітних доменів, в границях яких електронні спіни орієнтовані взаємно паралельно. Можливі розміри доменів складають (0,001 - 10) мм³ при товщині границь між ними в декілька десятків або сотень ангстрем.

Монокристали феромагнітних речовин відзначаються магнітною анізотропією, яка виявляє себе в неоднаковій мірі намагнічування уздовж різних осей в монокристалі. При намагнічуванні монокристала феромагнетика має місце зміна його лінійних розмірів. Це явище називається **магнітострикцією**. У монокристалі заліза магнітострикція неоднакова для різних напрямків у кристалі.

Процес намагнічування феромагнітних матеріалів характеризують **кривою намагнічування $B(H)$** (рис.2.1).

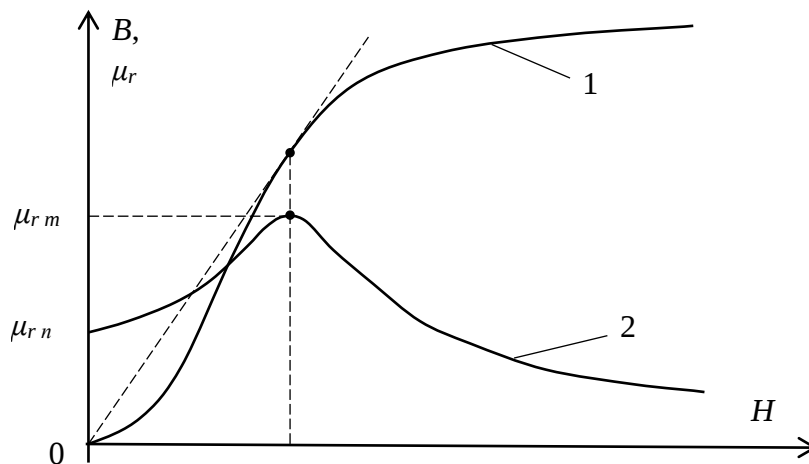


Рис. 2.1. Основна крива намагнічування (1) та залежність магнітної проникливості від напруженості магнітного поля (2)

Абсолютне значення магнітної проникливості μ_a , що характеризує здатність речовини до намагнічування, визначається за основною кривою намагнічування як відношення індукції B до напруженості магнітного поля H в даній точці кривої:

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad (2.1)$$

Таблиця 2.1.

ПРИКЛАД
Основні властивості магнітних матеріалів

Мате-ріал	Характерні зовнішні дані, механічні власти-вості	Склад, спосіб одер-жання	Основні магнітні властивості						Робочий діапазон частот, Гц	Сфера засто-су-вання
			Відносна магнітна проникливість		H_c – коерци-тивна сила, А/м	B_m – макси-мальна магнітна індукція, Тл	p – питомі магнітні втрати, Вт/кг	ρ – питомий електри-чний опір, мкОм·м		
			почат-кова $\mu_{r n}$	макси-мальна $\mu_{r m}$						
Альси-фер	Світлий, на зламі зернистий, крихкий	Склад сплаву: 9,5% Si, 5,6% Al, 84,9% Fe	35000	120000	1,8	1,1	-	0,8	Постій-ний струм	Магнітні екрани, корпуси вимірюва-льних приладів, для одержання магнітоді-електриків

На практиці зручніше користуватись відносною магнітною проникливістю μ_r , яка означає, у скільки разів абсолютна магнітна проникливість μ_a даного магнітного матеріалу перевищує абсолютну магнітну проникливість вакууму чи повітря:

$$\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0} \quad (2.2)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - абсолютна магнітна проникливість вакууму (магнітна стала).

Початкову магнітну проникливість μ_{rn} визначають при магнітній напруженості $H < 0,1$ А/м, тобто в дуже слабких полях. Найбільше значення магнітної проникливості μ_{rn} називається **максимальною магнітною проникливістю** (рис. 2.1). У сильних магнітних полях (у зоні насичення) значення μ_r наближається до одиниці.

Під час роботи феромагнетиків у змінних магнітних полях їх властивості визначаються **динамічною магнітною проникливістю $\mu_{r\sim}$** , яка є відношенням амплітудних значень індукції і напруженості магнітного поля. З підвищенням частоти перемагнічування величина $\mu_{r\sim}$ зменшується, що пояснюється інерційністю магнітних процесів.

При циклічному перемагнічуванні феромагнетиків графік залежності $B(H)$ має вигляд **гістерезисної петлі**. Змінюючи напруженість магнітного поля, можна одержати ряд петель гістерезису, як це показано на рис. 2.2.

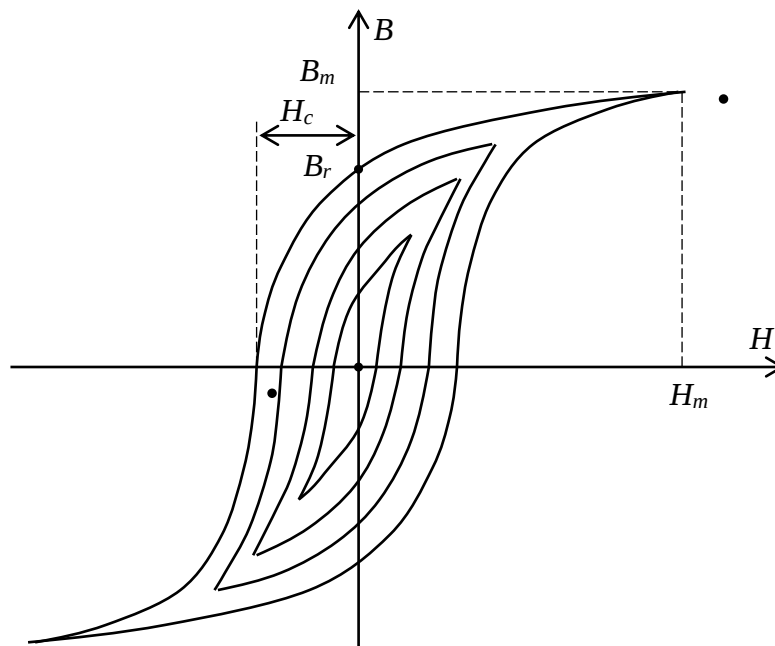


Рис. 2.2. Гістерезисні петлі при різних граничних значеннях напруженості магнітного поля.

Петля гістерезису при максимальній індукції $B = B_m$ називається **граничною**. Значення B при $H = 0$, яке одержане в процесі розмагнічування матеріалу зі стану насичення, називається **залишковою індукцією** B_r . Для доведення індукції від значення B_r до нуля необхідно прикласти до зразка зворотну за напрямом дії напруженість H_c , яка зветься **коерцитивною силою**.

Матеріали з малим значенням H_c та великою магнітною проникливістю називають **магнітом'якими магнітними матеріалами**. Їх застосовують для виготовлення магнітопроводів електричних машин, трансформаторів та інших пристроїв, в яких використовуються змінний магнітний потік. Матеріали з великою коерцитивною силою та порівняно малою проникливістю мають назву **магнітотвердих**. Їх використовують в якості постійних магнітів.

Процес перемагнічування феромагнетиків у змінному магнітному полі супроводжується втратами енергії, які призводять до нагрівання матеріалу. Ці втрати зумовлені гістерезисом та вихровими струмами в об'ємі феромагнетика. Втрати на гістерезис для кожного матеріалу можуть бути визначені за площею петлі гістерезису, одержаної при повільному перемагнічуванні, з урахуванням масштабів по осях B і H та частоти перемагнічування. Потужність втрат на гістерезис може бути визначена за формулою:

$$P_{\Gamma} = \eta \cdot B_m^n \cdot f \cdot V \quad (2.3)$$

де η – коефіцієнт, залежний від структури матеріалу;

B_m – амплітуда магнітної індукції;

f – частота перемагнічування;

V – об'єм феромагнетика;

n – показник ступеню ($n = 1,6 \dots 2$).

Потужність втрат на вихрові струми зменшується у разі збільшення питомого електричного опору феромагнетика і може бути визначена за формулою:

$$P_e = \xi \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot V \quad (2.4)$$

де ξ – коефіцієнт, залежний від властивостей феромагнетика та його форми (зокрема, він пропорційний квадрату товщини матеріалу та обернено пропорційний густині і його питомому електричному опору). Із порівняння формул (2.3) і (2.4) виходить, що при високих частотах f слід звертати увагу в першу чергу на втрати від вихрових струмів.

Магнітом'які низькочастотні матеріали

Технічно чисте залізо, яке ще називають АРМКО-залізом (від абр. [ARMCO](#) — скороченої назви американської фірми [American Rolling Mill Corporation](#)), одержують переплавленням сталюого брухту або рафінуванням

чавуну в мартенівських печах чи конверторах. Воно містить в собі невелику кількість (менше 0,1 %) домішок вуглецю, сірки, марганцю, кремнію та інших елементів, які погіршують його магнітні властивості. Ці властивості такі: $\mu_{rn} = 250$; $\mu_{rm} = 7000$; $H_c = 64$ А/м; $B_m = 2,15$ Тл. Через порівняно низький питомий опір ($\rho = 0,1$ мкОм·м) та відносно великі втрати при промисловій частоті ($p_{1/50} = 2,7 \dots 3,5$ Вт/кг), технічно чисте залізо використовують тільки у випадку постійних магнітних полів (магнітопроводи електричних машин постійного струму, полюсні наконечники електромагнітів, електровимірювальні прилади тощо).

Кремниста електротехнічна сталь – це сплав заліза з кремнієм. Присутність кремнію підвищує питомий електричний опір, що зменшує втрати на вихрові струми. Крім того, кремній сприяє виділенню вуглецю у вигляді графіту, а також майже повному розкисленню сталі, тобто переведенню кисню на шлак (кремнезем). Це призводить до збільшення μ_{rn} , зменшення H_c та до зниження втрат на гістерезис порівняно з технічно чистим залізом. З іншого боку, наявність кремнію призводить до зменшення індукції насичення B_m та погіршення механічних властивостей (підвищується твердість та крихкість). Тому концентрація кремнію в сталі не повинна перевищувати 4,8%.

Листи кремнистої сталі виготовляють прокаткою заготовок в нагрітому чи холодному стані. Тому розрізняють гарячекатану та холоднокатану кремнисті сталі. У процесі холодної прокатки (з великим обтиском та особливою термічною обробкою) одержують текстуровану сталь крупнокристалічної будови, в листах якої кристали орієнтовані осями легкого намагнічування у напрямку прокатки (рис. 2.3).

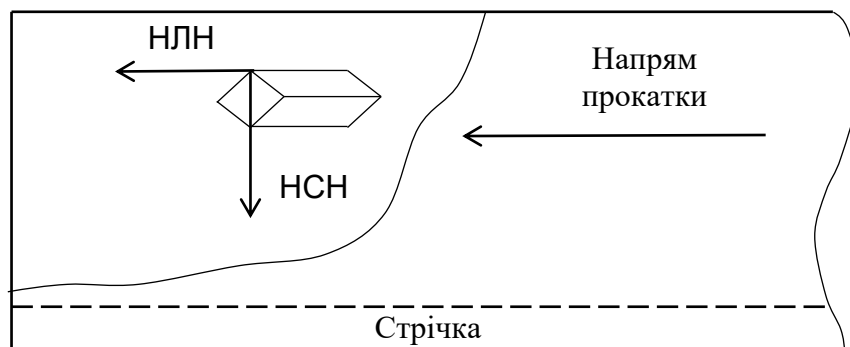


Рис.2.3. Орієнтація монокристалів заліза в холоднокатаній текстурованій сталі:

НЛН - напрямок легкого намагнічування;

НСН - напрямок середнього намагнічування.

Магнітні властивості такої сталі в напрямку прокатування значно кращі порівняно з гарячекатаною. Застосування холоднокатаних текстурованих сталей вимагає такої конструкції магнітопроводу, в якій магнітний потік проходить у напрямку найкращих магнітних властивостей, тобто в напрямку прокатки. Цій

умові відповідають виті магнітопроводи, виготовлені із стрічки, або магнітопроводи із зігнутих смуг, змонтованих у стик.

Сталь електротехнічна тонколистова (завтовшки 0,1–1мм), випускається у вигляді листів, рулонів, стрічок, маркірується чотирма цифрами. Перша цифра означає клас, тобто структурний стан та вид прокатки: 1 – гарячекатана ізотропна; 2 – холоднокатана ізотропна; 3 – холоднокатана анізотропна з ребровою текстурою; 5 – холоднокатана ізотропна з площинною кубічною текстурою. Друга цифра означає приблизну концентрацію кремнію: 0 – до 0,4%; 1 – 0,4...0,8%; 2 – 0,8...1,8%; 3 – 1,8...2,8%; 4 – 2,8...3,8%; 5 – 3,8...4,8%. Третя цифра означає нормовані магнітні характеристики: 0 – питомі втрати p при магнітній індукції $B = 1,7$ Тл та частоті $f = 50$ Гц ($p_{1,7/50}$); 1 – питомі втрати p при $B = 1,5$ Тл та $f = 50$ Гц ($p_{1,5/50}$); 2 – питомі втрати p при $B = 1,0$ Тл та $f = 400$ Гц ($p_{1,0/400}$); 4 – питомі втрати p при $B = 0,5$ Тл та $f = 3000$ Гц; 6 – магнітну індукцію B в слабких магнітних полях при напруженості поля $H = 0,4$ А/м ($B_{0,4}$); 7 – магнітну індукцію B в середніх магнітних полях при напруженості поля $H = 10$ А/м ($B_{1,0}$). Четверта цифра (від 1 до 8) визначає порядковий номер типу сталі з поліпшенням магнітних властивостей у міру зростання цього номера.

Максимальна відносна магнітна проникливість μ_{rm} гарячекатаних сталей (клас 1) перебуває у межах 3000...10000, холоднокатаних (клас 3) – 40000 і більше. Питомі магнітні втрати в сталі завтовшки 0,35 мм: класу 1 (сталь 1513) – $p_{1,5/50} = 2,5$ Вт/кг; класу 2 (сталь 2411) – $p_{1,5/50} = 3,0$ Вт/кг; класу 3 (сталь 3414) – $p_{1,5/50} = 1,1$ Вт/кг. Електротехнічну сталь застосовують в магнітних системах електричних машин, апаратів та приладів, що працюють на змінному струмі промислової частоти (50 Гц), при підвищеній частоті (400 Гц, 800 Гц) та при середніх та сильних магнітних полях.

Пермалой - це сплав заліза з нікелем. Відзначаються високою магнітною проникливістю в слабких магнітних полях та малою коерцитивною силою, Високонікелеві пермалої мають вміст нікелю 70...80%, а низьконікелеві – 40...50%. У марках пермалоїв, наприклад, 79НМ, 80НХС число означає процентний вміст нікелю, буква Н визначає нікель, М – марганець, Х – хром, С – кремній, К – кобальт, Д – мідь, П – з прямокутною петлею гістерезису. Низьконікелеві пермалої (45Н, 50Н, 50НХС) мають такі властивості: $\mu_{rn} = 1700...3200$; $\mu_{rm} = 15000...35000$;

$H_c = (8...32)$ А/м; $B_m = (1,0...1,5)$ Тл; $\rho = (0,45...0,9)$ мкОм·м.

Високонікелеві пермалої (79НМ, 80НХС, 76НХД) мають такі властивості: $\mu_{rn} = 16000...35000$; $\mu_{rm} = 5000...22000$; $H_c = (1,0...5,2)$ А/м; $B_m = 0,65$ Тл; $\rho = 0,55$ мкОм·м.

Пермалої поряд з хорошими магнітними властивостями мають недоліки – містять дефіцитний нікель, потребують складної термообробки, під дією механічного напруження магнітні властивості відпалених зразків помітно

погіршуються. Сплави виготовляють у вигляді холоднокатаних стрічок (0,02...2,5) мм, гарячекатаних та кованих прутків діаметром (8...10) мм. Застосовують пермалої для виготовлення осердь малогабаритних трансформаторів (у тому числі силових), дроселів, імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів, магнітних екранів. Основна особливість у тому, що цей матеріал використовується для отримання високої індукції в малих магнітних полях. Його застосовують як для постійного струму, так і для струмів звукової частоти до 15 кГц.

Альсифер – сплав заліза з кремнієм та алюмінієм. Оптимальний склад: 9,5% Si, 5,6% Al, 84,9% Fe. Його основні властивості: $\mu_{rn} = 35000$; $\mu_{rm} = 120000$; $H_c = 1,8$ А/м; $B_m = 1,8$ Тл; $\rho = 0,8$ мкОм·м, тобто не поступаються властивостям високонікелевих пермалоїв. Через труднощі одержання точного складу компонентів промислові альсифери мають значно гірші показники. Сплав відзначається твердістю та крихкістю, виготовляють литвом з товщиною стінки виробу не менше 2мм. Литий альсифер застосовують при постійному струмі в якості магнітних екранів, корпусів приладів і т. п. Завдяки крихкості альсифер відносно легко розмелюється на порошок і застосовується в такому стані для виготовлення високочастотних матеріалів (магнітодіелектриків) шляхом пресування.

Аморфні сплави, які ще називають металічним склом, вміщують як основну складову один або декілька перехідних металів (Fe, Ni, Co) – у кількості 75...85% та металоїд – склоутворювач (B, C, Si, P) у кількості 15...20%. Крім цього, аморфні сплави містять в собі легувальні метали – Cr, Ta, V, Mn та інші, що надають сплавам деяких специфічних властивостей. У цих сплавах відсутня властива кристалічному стану періодичність при розміщенні атомів. Тому що, їх сплави формують при такій високій швидкості охолодження, за якою частинки не встигають вишикуватися в правильну кристалічну структуру. Практично їх одержують швидким гартуванням розплавів – "виплескуванням" розплаву на холодну підкладку, яка швидко переміщується.

Електромагнітні властивості аморфних сплавів близькі до властивостей пермалоїв, але менш підвладні впливу механічних напружень, мають високу корозійну стійкість, міцність та твердість при збереженні пластичності. При цьому питомий електричний опір аморфних сплавів в 2...3 рази більший, ніж у пермалоїв, що значно зменшує втрати на вихрові струми. Завдяки відносній простоті технології виготовлення, магнітом'які аморфні сплави мають дуже широке застосування.

Магнітом'які високочастотні матеріали

Магнітодіелектрик - це пластична маса, в якій зв'язуючим є діелектрик (полістирол, бакеліт, нітролаки, скло тощо), а наповнювачем - магнітом'який феромагнетик у вигляді порошку із розмеленого альсиферу, пермалою,

карбонільного заліза, магнетиту. Одержують їх пресуванням. Завдяки ізоляції між феромагнітними частинками магнітодіелектрики мають великий питомий електричний опір і тому їх використовують при високих частотах (0,1...100 МГц). З іншого боку, наявність проміжків між частинками різко знижує магнітну проникливість матеріалу (у магнітодіелектриків $\mu_r = 10...250$), але робить її практично незалежною від напруженості магнітного поля.

З магнітодіелектриків виготовляють кільцеві, циліндричні, броньові осердя для роботи в слабких магнітних полях звукових та надзвукових частот (індукція насичення магнітодіелектриків не вища 0,3...0,4 Тл), до яких ставиться вимога високої магнітної стабільності. Наприклад, магнітодіелектрики використовуються для виготовлення вимірювальних трансформаторів, апаратури високочастотної телефонії, радіоапаратури.

можуть бути як магнітно-твердими матеріалами, так і магнітно-м'якими матеріалами. Магнітно-м'які М. отримують в осн. з тонких порошків карбонільного заліза, молібденового пермалою і алсіфера; їх застосовують для виготовлення сердечників котушок індуктивності, фільтрів, дроселів та ін радіотехні. пристроїв, що працюють при частотах 104-108 Гц. Магнітно-тверді М. виготовляють на основі порошків із сплавів алні (Fe - Ni - Al - Cu), Алніко (Fe - Ni - Al - Co), феритів.

Ферити - це хімічні сполуки оксиду заліза Fe_2O_3 з оксидами деяких двовалентних або одновалентних металів відповідно до формули $MeO \cdot Fe_2O_3$, де Me - символ двовалентних металів Mn, Ni, Zn, Co та інших. Ферити – іонні кристалічні речовини, що поєднують хороші магнітні властивості з надзвичайно високим питомим електричним опором, який на 5...16 порядків більш високий порівняно з металевими феромагнетиками. При виготовленні феритових виробів попередньо одержують порошок із тонкоподрібнених, перемішаних і попередньо обпалених оксидів відповідних металів. До порошку додають пластифікатор, наприклад, парафін, а із одержаної маси пресують під великим тиском вироби потрібної форми. Далі, вироби обпалюють при температурі 1100...1400°C. При цьому у феритах відбувається спікання і утворення твердих розчинів. Спікання необхідно проводити в окислювальному середовищі (звичайно, у повітрі) щоб не відбулося відновлення оксидів. Ферити – тверді та крихкі матеріали, які обробляються тільки шліфуванням. Початкова магнітна проникливість феритів коливається від декількох одиниць до 20 тисяч, максимальна магнітна проникливість досягає 35000, коерцитивна сила – 0,24...120000 А/м, індукція насичення – 0,08...0,5 Тл. Втрати потужності у феритах оцінюють величиною тангенса кута магнітних втрат $tg \delta$ від 0,005 до 0,1. Питомий електричний опір феритів 0,001... 10^{10} Ом·м, тобто відносно великий, і тому магнітні втрати від вихрових струмів дуже малі і ними можна знехтувати. Ферити також мають малі втрати на гістерезис.

Найбільш поширені у використанні ферити: марганцево-цинкові, нікелево-

цинкові, літєво-цинкові. Маркірування феритів (наприклад, 20000НМ, 600НН, 20ВЧ2): перша цифра – початкова магнітна проникливість, подальші букви позначають частотний діапазон роботи. Буква Н - низькочастотні ферити, гранична частота яких для різних марок змінюється від 0,1 до 50 МГц, ВЧ – високочастотні ферити, їх граничні частоти – від 50 до 600 МГц. Далі буквами позначається склад фериту: М - марганцево-цинковий, Н – нікелево-цинковий і т.п. Подальші цифри означають різновид фериту.

Магнітом'які ферити використовують для виготовлення осердь високочастотних котушок індуктивності, трансформаторів, магнітних антен, магнітних головок, деталей відхиляючих систем телевізійних трубок і багатьох інших пристроїв високочастотної (більше 1000 Гц) та імпульсної техніки.

Для виготовлення постійних магнітів використовують магнітотверді ферити, найчастіше – ферити барію.

Контрольні запитання та завдання

18. Назвіть основні властивості феромагнетиків та поясніть їх сутність.
19. Поясніть причини втрат потужності у феромагнетиках.
20. Наведіть формули для розрахунку різних видів втрат потужності у феромагнетиках.
21. Вкажіть склад та властивості електротехнічної сталі.
22. Розшифруйте маркірування електротехнічної сталі.
23. Вкажіть склад пермалоїв та їх основні магнітні властивості.
24. Як маркірують пермалої?
25. Який оптимальний склад альсиферу?
26. Наведіть значення магнітних характеристик альсиферу.
27. Наведіть структуру аморфних сплавів та поясніть їх основні властивості.
28. Яку будову мають магнітодіелектрики та сфери їх застосування?
29. Поясніть склад, властивості і маркірування феритів, сфери їх застосування.
30. Опишіть технологію виготовлення феритів.
31. Охарактеризуйте вимоги, що ставляться до магнітом'яких матеріалів.

СПИСОК ОСНОВНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с.
2. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 320 с.
3. Журавльова Л.В., Бондар В.М. Електроматеріалознавство: Підручник. – К.: Грамота, 2006. – 312 с.

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. Курносов 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.

ЗМІСТ

Лабораторна робота ЕТМ - 1/1 Вивчення властивостей електроізоляційних матеріалів	3
Лабораторна робота ЕТМ - 1/3 Визначення електричної міцності рідинних діелектриків	14
Лабораторна робота ЕТМ – 2/1 Вивчення властивостей магнітних матеріалів	22
Список основної літератури	32
Список додаткової літератури	32

Упорядники:
Колб Андрій Антонович
Бобров Олексій Володимирович
Лябогова Тетяна Валеріївна

**МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
лабораторних робіт ЕТМ-1 з дисципліни “Електроматеріалознавство”,**

Редакційно-видавничий комплекс

Підписано до друку 2020. Формат 30х42/4.Папір Pollux.
Ризографія. Умовн. друк. арк. 2,5.Обліково-видавн. арк. 2,5.
Тираж 500 прим. Зам. №

Надруковано з готових оригінал-макетів у редакційно-видавничому комплексі
Національного технічного університету “Дніпровська політехніка”
49005, ДСП, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19.