

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні рекомендації

для виконання самостійної роботи здобувачами вищої освіти
ступеня «бакалавр» спеціальності 141 «Електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки» денної форми навчання

Миколаїв
2017

УДК621.315.5

ББК 31.23я73

Л47

Друкується за рішенням методичної ради інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету, протокол № 11 від 08.06.17р.

Укладачі:

О.О. Плахтир - канд. техн. наук, доцент кафедри енергетики аграрного виробництва Миколаївського національного аграрного університету

О.М. Циганов - асистент кафедри енергетики аграрного виробництва Миколаївського національного аграрного університету

Рецензент:

Д.Л. Кошкін - канд. техн. наук, доцент директор інституту післядипломної освіти Миколаївського національного аграрного університету

© Миколаївський національний аграрний
університет, 2017

ЗМІСТ

Вступ	4
Самостійна робота № 1. Практичне вивчення електротехнічних матеріалів	9
Самостійна робота №2. Дослідження явища поляризації та втрат в діелектричних матеріалах	17
Самостійна робота №3. Визначення об'ємного та поверхневого питомих опорів твердих діелектриків	29
Самостійна робота №4. Визначення електричної міцності повітряних проміжків	37
Самостійна робота №5. Визначення електричної міцності трансформаторного масла	43
Самостійна робота №6. Визначення електричної міцності твердих діелектриків	51
Самостійна робота №7. Дослідження температурної залежності питомого опору напівпровідникових матеріалів	60
Самостійна робота №8. Дослідження температурної залежності питомого опору провідникових матеріалів	74
Висновки	88
Список літератури	89

ВСТУП

Стабільний розвиток економіки держави значною мірою залежить від надійного функціонування систем енергозабезпечення. Сучасна електроенергетика використовує в елементах конструкцій надзвичайно широкий спектр різноманітних електротехнічних матеріалів (ЕТМ), від електричних, механічних, фізико-хімічних й інших властивостей яких значною мірою залежить надійність роботи електроенергетичного обладнання. Тому актуальним завданням забезпечення систем електроспоживання якісним обладнанням є розробка і впровадження нових, більш якісних матеріалів з кращими функціональними і експлуатаційними характеристиками.

При проектуванні та розробці нових електротехнічних приладів і обладнання з покращеними характеристиками знання електрофізичних, фізико-технічних і механічних властивостей використовуваних матеріалів є обов'язковою умовою раціонального вирішення цього завдання. Забезпечення високої надійності роботи електроенергетичного обладнання ґрунтується, насамперед, на чітких уявленнях про процеси, що відбуваються в матеріалах протягом їх експлуатації, на знаннях про методи профілактичного контролю та випробування електротехнічних виробів на їх основі, вимогах чинних ДСТУ, нормативних і технічних умовах їхнього використання. Це є гарантом надійної роботи електричних мереж і всього комплексу енергетичного обладнання: генераторів, трансформаторів, комутаційних апаратів, компенсувальних пристроїв та інших, в конструкції яких використовують ЕТМ. Вони знаходяться під впливом різноманітних зовнішніх факторів, у тому числі сильних електромагнітних полів, високих температур, статичних і динамічних навантажень, атмосферних впливів. Тому знання умов забезпечення стабільності параметрів цих матеріалів під дією вказаних факторів є важливим для забезпечення безперебійного функціонування електрообладнання та всієї електроенергетичної системи в цілому.

Дисципліна «Електротехнічні матеріали» є нормативною для всіх електротехнічних і електроенергетичних спеціальностей, оскільки в ній комплексно розглядаються властивості матеріалів, у тому числі в реальних умовах експлуатації електроенергетичного обладнання. Виконання здобувачами вищої освіти самостійних робіт дасть можливість отримати практичні навички з методів випробування ЕТМ, вивчити їх характеристики та навчитись використовувати їх в реальних електротехнічних конструкціях. Запропоновані методичні вказівки розроблений відповідно до програми дисципліни «Електротехнічні матеріали» й призначений для допомоги здобувачам вищої освіти при виконанні самостійних робіт.

Практикум містить опис самостійних робіт, основні теоретичні відомості для підготовки до виконання самостійних робіт, методiku дослідження характеристик електротехнічних матеріалів, методи випробування та застосування ЕТМ на практиці, обробку результатів

експериментів і порівняння їх з теоретичними розрахунками, порядок оформлення звіту та контрольні питання.

Особливістю даної методичної рекомендації з дисципліни “Електротехнічні матеріали” є те, що здобувач вищої освіти виконує його, маючи вже певні навички роботи з електричними колами, вимірювальними приладами, апаратурою регулювання, які отримав при вивченні дисциплін “Теоретичні основи електротехніки”, “Робітнича професія”. Тому при виконанні самостійних робіт здобувач вищої освіти повинен вміти вирішувати практичні інженерні задачі, складати різні схеми для випробування ЕТМ та ізоляційних конструкцій.

Кожна робота розрахована на дві години занять в лабораторії і передбачає обов'язкову самостійну підготовку до неї. Успішне самостійне проведення потребує від здобувача вищої освіти систематичної роботи з різними джерелами інформації.

Організація і методика проведення самостійних занять Правила внутрішнього розпорядку в навчальній лабораторії

На першому занятті в лабораторії здобувачі вищої освіти детально вивчають на робочих місцях правила внутрішнього розпорядку та інструкції з техніки безпеки, яких повинні суворо дотримуватись протягом роботи в лабораторії.

Правила внутрішнього розпорядку в лабораторії складаються з таких основних вимог.

До роботи в лабораторії допускаються особи, які засвоїли правила техніки безпеки та пройшли інструктаж з відповідною відміткою про це у спеціальному журналі.

Перед початком занять викладач шляхом опитування визначає підготовку здобувача вищої освіти до поточної роботи. Непідготовлені здобувачі вищої освіти допускаються до виконання роботи лише після додаткової підготовки безпосередньо в лабораторії.

Звіт про проведену самостійну роботу складається один на бригаду і захищається перед черговим заняттям. Оцінка за захищену самостійну роботу заноситься до журналу обліку виконаних самостійних робіт. Звіт захищеної роботи не повертається.

6. При підготовці до самостійної роботи здобувач вищої освіти зобов'язаний ознайомитись з порядком її виконання, технічними даними приладів і способами їх вмикання, перевірити відповідність меж вимірювання приладів очікуваним значенням вимірюваних величин і зібрати електричну схему дослідної установки.

Самовільне (без перевірки викладачем) вмикання зібраної схеми в електричну мережу категорично забороняється.

Відповідальність за можливі наслідки вмикання неперевіреної схеми несуть усі члени бригади.

При перемиканнях потрібно обов'язково знеструмити схему. Вмикати

змінену схему дозволяється лише після перевірки її викладачем.

У випадку неполадок у схемі (перегорання запобіжників та ін.) звертатись за допомогою до викладача.

У випадку виходу з ладу обладнання через недотримання даних правил складається акт і передається ректору через директорат.

В лабораторії забороняється палити, смітити, голосно розмовляти, знаходитись у верхньому одязі, без необхідності переходити з місця на місце і захаращувати робочі місця сторонніми предметами. Забороняється присутність сторонніх осіб.

Самостійна робота вважається завершеною лише тоді, коли виконані всі вимірювання, проведені необхідні розрахунково-експериментальні роботи, побудовані графіки, які передбачені програмою роботи, і разом з протоколом випробувань схвалені викладачем, розібрана електрична схема, прилади і апарати приведені в належний стан та прибране робоче місце.

Інструкція з техніки безпеки в лабораторії “Техніки високих напруг та ЕТМ”

Здобувачам вищої освіти, що виконують самостійні роботи, пов’язані з використанням напруги вище 1000В, слід пам’ятати, що вони небезпечні для людини.

Здобувачі вищої освіти, які працюють в лабораторії, повинні суворо дотримуватись вимог інструкції з техніки безпеки.

Починаючи роботу, впевнитись у тому, що на лабораторному стенді відсутня напруга, тобто рубильники, автомати, пакетні вимикачі, що живлять схему, вимкнені.

Складання, розбирання чи зміну схеми здійснювати тільки з дозволу викладача.

Забороняється вмикати зібрану чи змінену схему без попередньої перевірки її викладачем.

Забороняється торкатися струмопровідних частин схеми та металевих частин незаземлених електричних апаратів, якщо на панелі є напруга.

Всі операції виконувати тільки однією рукою. Слід уникати торкання будь-якою частиною тіла металевих або вологих предметів. Небезпечно, наприклад, торкатись металевої огорожі, водопровідних труб, труб центрального опалення, знаходитись на мокрій або цементній підлозі.

Перед вмиканням напруги впевнитись у тому, що всі регулювальні апарати знаходяться у вихідному положенні. Після вимкнення напруги необхідно негайно встановити на всіх регулювальних апаратах вихідне положення.

Перед ввімкненням напруги попередити про це всіх учасників роботи і впевнитись, що нікому з них не загрожує небезпека потрапити під напругу.

Якщо при торканні до будь-якої частини обладнання відчувається напруга, необхідно припинити роботу, вимкнути живлення стенда і викликати викладача.

Якщо перед початком чи під час роботи буде виявлена несправність обладнання, слід припинити роботу, вимкнути напругу і повідомити викладача про неполадки. Усувати пошкодження власними силами забороняється.

При роботі з електричними колами змінного струму, що містять конденсатори, необхідно бути особливо обережним, оскільки можливе значне зростання напруги на окремих ділянках кола порівняно з напругою джерела струму внаслідок можливої появи резонансу напруги.

Забороняється виконувати будь-які роботи на зворотній стороні панелі керування і заходити за огорожу обладнання.

Забороняється починати виконувати чергову роботу без отримання допуску у викладача.

Забороняється залишати лабораторію без дозволу викладача.

Забороняється залишати без нагляду установки, приведені в робочий стан.

Перед початком роботи слід розподілити між членами бригади обов'язки, визначити керівника бригади для забезпечення дотримання правил техніки безпеки.

Рекомендується зупиняти роботу обладнання, коли виникає необхідність обговорити подальший план роботи.

Забороняється переносити прилади з однієї установки на іншу, залишати на підлозі невикористані провідники, з'єднувати пошкоджені провідники для подальшого використання.

Всі роботи на головних розподільних щитах виконуються тільки персоналом, який їх обслуговує.

Після опрацювання даної інструкції на першому самостійному занятті всі здобувачі вищої освіти зобов'язані розписатись в лабораторному журналі з техніки безпеки.

Без вивчення інструкції і відмітки про це в журналі викладачем категорично забороняється допускати здобувача вищої освіти до виконання самостійних робіт.

Вимоги до звіту з самостійної роботи

Звіт повинен бути акуратно складений, на аркушах формату А4 з рамками. На титульному листі вказується: номер та назва роботи, дата проведення експерименту, шифр групи та номер бригади, а також прізвища та ініціали всіх членів бригади.

До складу звіту входять: мета роботи, програма досліджень, схеми самостійних досліджень, результати досліджень та розрахунків, опорні формули для розрахунків, необхідні побудовані характеристики з відповідним їх аналізом та загальні висновки.

Принципові електричні схеми виконуються з дотриманням вимог ДЕСТів.

Звіт з самостійної роботи складається один на бригаду. Захист

самостійної роботи здійснюється в складі бригади. Якщо з якихось причин здобувач вищої освіти захищає самостійну роботу самостійно, він має право подати копію звіту.

Звіт з самостійної роботи повинен відповідати вимогам, що висуваються до звітів промислових і наукових досліджень електроустановок. Звіти, що не відповідають даним вимогам, неповні за обсягом чи неохайно оформлені, до захисту не приймаються.

САМОСТІЙНА РОБОТА № 1

ПРАКТИЧНЕ ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Мета роботи

Вивчення основних властивостей і зовнішнього вигляду електротехнічних матеріалів.

1.2. Основні теоретичні відомості

Можливість і ефективність використання певних електротехнічних матеріалів при визначених умовах експлуатації залежить від їх фізико-механічних, технологічних та електричних властивостей.

У роботі вивчається зовнішній вигляд електротехнічних матеріалів, що представлені на стендах. Нижче розглядаються їх основні властивості, переваги та недоліки, особливості виробництва та використання.

1.3. Полімери (або смоли), які мають лінійну будову молекул та їх характеристики

Ці смоли термопластичні і переробляються найпрогресивнішими методами у виробі, тобто технологічні. Вони здатні витягуватися в волокна, з них можна виготовити широкий асортимент плівчастих виробів. Вони мають достатню механічну міцність і використовуються часто у вигляді чистих смол без наповнювачів.

Майже всі представники термопластичних полімерів є волого- і тропікостійкими, тобто тривкими до розвитку мікроорганізмів. Винятком є пластифіковані матеріали на базі цих полімерів, оскільки сам пластифікатор часто виявляється поживним середовищем для мікроорганізмів.

Радіоактивне опромінення лінійних термопластичних смол невеликими дозами призводить, як правило, до підвищення теплостійкості, твердості, крихкості, до погіршення електричних характеристик. Великі дози радіації викликають деструкцію цих смол. Особливо низькою радіаційною стійкістю характеризуються фторопласти, ефіри целюлози, органічне скло.

Фторопласт-4 – нейтральний, тобто з симетричною молекулою, молочно-білого кольору полімер з жирнуватою та м'якою поверхнею, не горить, не фарбується.

Він має відмінні електричні характеристики: $E_{\text{пр}}=40\text{--}60$ (в тонких плівках до 250) МВ/м; $\text{tg}\delta=10\text{--}4$; $\epsilon=1,8\text{--}2,2$; $\rho_v=10^{16}$ Ом \times м; робочі температури -70°C – $+200^\circ\text{C}$.

Недоліками фторопласта-4 є висока густина (2200 кг/м^3), низька радіаційна стійкість і так званий “холодний плин”. Фторопласт-4 роздавлюється при тривалому статичному навантаженні. Серед переваг необхідно відзначити вологостійкість, тропікостійкість, хімічну стійкість.

Поліетилен – нейтральний полімер з тими ж поверхневими характеристиками. Горить, фарбується, має високу хімічну стійкість, вологостійкий, тропікостійкий.

Електричні характеристики близькі до характеристик інших лінійних

полімерів.

$E_{\text{пр}}=40\text{--}60$ (в тонких плівках до 120) МВ/м; $\text{tg}\delta = 10\text{--}4$; $\epsilon = 2,4$; $\rho_v = 1016$ Ом \times м.

Він має непогані механічні характеристики. Діапазон робочих температур $-70^\circ\text{C} - +120^\circ\text{C}$.

Деталі з поліетилену з'єднують зварюванням.

Полістирол – полярний лінійний полімер, безбарвний, легко фарбується. Має тверду поверхню, легко полірується. Полярність його молекули викликає бензолове кільце-радикал, крупне і малорухоме в електричних полях. Тому за властивостями полістирол близький до нейтральних лінійних полімерів.

$E_{\text{пр}}=20$ МВ/м; $\text{tg}\delta=10\text{--}4$; $\epsilon=2,2\text{--}2,4$; $\rho_v=1016$ Ом \times м.

Полістирол стійкий до дії лугів та кислот, але нестійкий до ароматичних та хлорованих вуглеводнів, завдяки чому на основі полістиролу виготовляють лаки і клеї. Діапазон робочих температур $-40^\circ\text{C} - +85^\circ\text{C}$.

Поліамідні смоли – мають лінійну будову молекул, відмінні ливарні якості. При холодному протягуванні поліамідів одержують волокна з дуже високою міцністю. Вони є стійкими до дії багатьох органічних розчинників. Під дією вологи, світла, тепла та під впливом електричного поля полімери старіють, збільшується їх схильність до розтріскування. Їхні електричні характеристики:

$E_{\text{пр}}=18\text{--}23$ МВ/м; $\text{tg}\delta=10\text{--}12$; $\epsilon=3,7\text{--}3,9$; $\rho_v=1014$ Ом \times м.

Діапазон робочих температур - $40^\circ\text{C} - +100^\circ\text{C}$, в маслах можуть працювати до 140°C .

Полівінілхлорид використовують у двох модифікаціях:

без пластифікатора – вініпласт;

з пластифікатором – пластикат.

Вініпласт є твердим, механічно міцним матеріалом. Пластикат – гнучкий, з нього виготовляють плівкові вироби, ізоляції дротів та кабелів.

Полівінілхлорид має високу хімічну стійкість та вологостійкість. Він є полярним, його електричні характеристики:

$E_{\text{пр}}=30\text{--}40$ МВ/м; $\text{tg}\delta = 10\text{--}2$; $\epsilon = 4\text{--}6$; $\rho_v=1014$ Ом \times м.

Діапазон робочих температур $-10^\circ\text{C} - +60^\circ\text{C}$.

Органічне скло – полярний полімер, що легко фарбується і полірується. Найчастіше його використовують для виготовлення установчих деталей. Органічне скло легко розчиняється в хлорованих вуглеводнях (діхлоретані, чотирихлорному вуглеводні) і є сильно полярною речовиною.

$E_{\text{пр}}=25\text{--}30$ МВ/м; $\text{tg}\delta = 10\text{--}2$; $\epsilon = 3,7$; $\rho_v=1012$ Ом \times м.

Діапазон робочих температур $-80^\circ\text{C} - +80^\circ\text{C}$.

Лавсан – використовують у вигляді плівки та волокон. Він має високу механічну міцність та широкий діапазон робочих температур ($-80^\circ\text{C} - +160^\circ\text{C}$). Його електричні показники в плівці такі: $E_{\text{пр}}=30 - 120$ МВ/м; $\text{tg}\delta = 10\text{--}2$; $\epsilon = 3,5$; $\rho_v=1014$ Ом \times м.

Вологостійкий та тропікостійкий, при підвищених температурах легко окислюється.

Еластomers (каучук та гума). Ці матеріали названі так тому, що при розтягуванні легко подовжуються, а після вивільнення повертаються до початкових розмірів і форми, тобто вони еластичні. Залежно від складу та технології виготовлення вони можуть мати такі властивості:

$$E_{\text{пр}}=20-30 \text{ МВ/м}; \text{tg}\delta=0,1-0,0005; \epsilon=2,5-7; \rho_v=1015 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Діапазон робочих температур від -60°C до $+220^{\circ}\text{C}$.

1.4. Термореактивні матеріали та їх характеристики

Преспорошки та шаруваті пластики – це пластмаси, з використанням як наповнювача подрібнених порошоків та волокон органічних або неорганічних речовин чи паперу та волокон органічного й неорганічного походження, що можуть бути складені шарами (шаруваті пластики). Для зв'язування використовують термореактивні та термопластичні смоли: фенолформальдегідні, поліефірні, епоксидні, кремнійорганічні.

Всі ці пластмаси мають високу теплостійкість – до 150°C - 200°C (а на базі азбестових волокон та кремнійорганічних смол – до 300°C) і характеризуються високою хімічною стійкістю та електричними характеристиками:

$$E_{\text{пр}}=20-30 \text{ МВ/м}; \text{tg}\delta=0,01-0,5; \epsilon=5-6; \rho_v=1012 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Папір, картон, фібри – належать до волокнистих матеріалів. Ці матеріали складаються з целюлози, що визначає їх основні переваги та недоліки. Вони легко окислюються, старіють при підвищених температурах, горючі. В непросоченому виді гігроскопічні, а при зволоженні знижують свою механічну міцність. Сухий, непросочений конденсаторний папір має такі електричні властивості:

$$E_{\text{пр}} \text{ до } 40 \text{ МВ/м, а просочений – до } 300 \text{ МВ/м, } \text{tg}\delta=0,03; \epsilon=3,7.$$

Менш цупкі види паперу (кабельний, намотковий) і картон мають набагато нижчу електричну міцність.

$E_{\text{пр}} = 15-45 \text{ МВ/м}$, а діелектричні втрати в 5-10 разів вищі порівняно з конденсаторним папером.

Крім електричних характеристик папір характеризується добрими механічними властивостями (особливо вздовж рулону). Його вартість невисока. Текстильні матеріали (нитки, тканини) мають, як правило, високу гнучкість, міцність на розривання, але дуже гігроскопічні і горючі. До негорючих неорганічних текстильних матеріалів належать скло та азботканина. Для покращення механічних, хімічних, теплових характеристик та вологостійкості текстильні матеріали просочують різними лаками (лакотканини).

Світлі лакотканини мають більш високу хімічну стійкість і теплостійкість (до 120°C). Чорні лакотканини (на бітумних лаках) мають кращі електричні характеристики, їх електрична міцність $E_{\text{пр}}$ сягає 70 МВ/м, тоді як у світлих тканинах не перевищує, здебільшого, 30 МВ/м. До групи неорганічних ізоляційних матеріалів належать скло, керамічні матеріали, сітали, азбест та матеріали на їх основі. Всі вони є складними системами різних оксидів, при цьому у склі оксиди об'єднані квазіізоморфною

структурою.

Електротехнічне скло – залежно від складу може мати такі властивості: $\text{tg}\delta=0,0002-0,01$; $\epsilon=4-16$; $\rho_v=1015 \text{ Ом}\times\text{м}$.

Поверхнева провідність сильно залежить від вологості навколишнього середовища, оскільки більшість типів скла має низьку гідролітичну стійкість (їх інколи називають частково розчинними у воді діелектриками). Електрична міцність скла залежить від складу. Великий вплив чинять газові включення, які різко зменшують $E_{\text{пр}}$. В однорідному постійному полі електрична міцність скла може сягати 500 МВ/м.

Сітали – близькі за властивостями до скла, проте мають набагато меншу крихкість та дещо кращі електричні властивості порівняно зі склом того ж складу. Крім того, їх поверхня відмінно полірується та добре змочується металами, що дозволяє використовувати їх як підкладки для мікросхем, тим більше, що, змінюючи їх склад, можна одержати сітали з коефіцієнтами лінійного розширення близькими до коефіцієнтів лінійного розширення металів.

Матеріали на базі азбесту використовують в електротехніці у вигляді стрічок, пряжі, тканин, паперу, картону, азбоцементу тощо. Особливістю азбестових волокон є те, що до температури $+500^\circ\text{C}$ азбест зберігає механічну міцність, тоді як органічні волокна руйнуються при більш низьких температурах.

Керамічні матеріали представлені практично всіма типами цих матеріалів: пасивною, активною, установчою та конденсаторною кераміками.

Низькочастотна кераміка (високовольтний фарфор) відрізняється від інших видів установчої кераміки більшою пористістю, більшими втратами ($\text{tg}\delta=10^{-2}$) та має проходити глазурування.

$E_{\text{пр}}=20-30 \text{ МВ/м}$; $\epsilon=6$.

Високовольтні високоякісні види установчої кераміки (стеатит, ультрафарфор, алюмініоксид) не завжди глазуються. Їх електричні характеристики:

$E_{\text{пр}}=30 \text{ МВ/м}$; $\text{tg}\delta=10^{-4}$; $\epsilon=6-9$.

Сегнетокераміка відрізняється великим $\epsilon=1500-7500$, $\text{tg}\delta=0,03$,

$E_{\text{пр}}=5 \text{ МВ/м}$. Використовують її для виготовлення малогабаритних конденсаторів, варікондів, у системах пам'яті ЕОМ.

Слюди: мусковіт (прозора) і флюгопіт (темна, непрозора) відрізняються анізотропією властивостей, легко розшаровуються на тонкі лусочки, мають високу теплостійкість.

Електричні властивості мусковіта: $E_{\text{пр}}$ до 300 МВ/м; $\text{tg}\delta=10^{-4}$; $\epsilon=7$; флюгопіта:

$E_{\text{пр}}$ до 60 МВ/м; $\text{tg}\delta=10^{-2}$; $\epsilon=9$.

Матеріали на основі слюди представлені міканітами, мікалексом, слюдотермом. Ці матеріали характеризує велика неоднорідність і більш низькі електричні властивості.

У мікалекса:

$E_{\text{пр}}$ до 20 МВ/м; $\text{tg}\delta=10^{-2}$; $\epsilon=6-8$; $\rho_v=1012 \text{ Ом}\times\text{м}$. У міканітів:
 $E_{\text{пр}}$ до 45 МВ/м; $\text{tg}\delta=10^{-2}$; $\epsilon=6-8$; ρ_v до 1014 $\text{Ом}\times\text{м}$. У слюдотерма:
 $E_{\text{пр}}$ до 30 МВ/м; $\text{tg}\delta=10^{-2}$; $\epsilon=6$; ρ_v до 1013 $\text{Ом}\times\text{м}$.

1.5. Провідникові, напівпровідникові і магнітні матеріали та їх характеристики

Електровугільні вироби одержують змішуванням сажі, природного графіту або антрациту зі зв'язувальною речовиною. Вони мають питомий електричний опір до 100 $\text{мкОм}\times\text{м}$, від'ємний температурний коефіцієнт питомого опору. Вугільні вироби працездатні до температур $+3000^\circ\text{C}$ в нейтральних атмосферах чи в вакуумі та до $+400^\circ\text{C}$ на повітрі. Матеріали на основі вуглецю використовують для виготовлення електродів, резисторів, щіток колекторних електричних машин.

Мідь та її сплави високої провідності. Мідь має низький питомий електричний опір – 0,0017 $\text{мкОм}\times\text{м}$, що поступається тільки показникам срібла та золота. Добре обробляється, краще за залізо чинить опір корозії, легко зварюється і загартовується. Проте вона дорога, має високу густину і часто не задовольняє вимоги до механічної міцності. Її $\zeta_{\text{в}}=280 \text{ МПа}$. Кращі механічні властивості мають сплави міді: бронза та латунь. Бронзи (берилійові та кадмієві) можуть мати $\zeta_{\text{в}}=1350 \text{ МПа}$. Латуні (сплав міді та цинку) добре піддаються деформуванню (прокатуванню, протягуванню тощо), мають високу міцність ($\zeta_{\text{в}} = 300\ldots 600 \text{ МПа}$).

Алюміній має більш низькі, порівняно з міддю, механічні та електричні властивості. Його $\rho_v=0,029 \text{ мкОм}\times\text{м}$, а $\zeta_{\text{в}}=80-160 \text{ МПа}$. Проте він у 3,5 рази легший за мідь та менш дорогий. Його сплави мають вищу міцність ($\zeta_{\text{в}}$ до 350 МПа) і дещо більше значення питомого електричного опору $\rho_v=0,031 \text{ мкОм}\times\text{м}$.

Вольфрам відрізняють від інших металів високі робочі температури (більше $+2000^\circ\text{C}$) та висока міцність волокна ($\zeta_{\text{в}}$ до 600 МПа). Використовують його для виготовлення контактів, які характеризуються малим механічним зношуванням, високою твердістю, високим опором електричній ерозії тощо.

До сплавів міді високого опору відносять:

Манганін – сплав міді з марганцем та нікелем – має робочу температуру до 200°C , добрі механічні властивості ($\zeta_{\text{в}}$ до 600 МПа) і високе ρ_v до 0,48 $\text{мкОм}\times\text{м}$.

Константан – сплав міді з нікелем – має високе ρ_v до 0,52 $\text{мкОм}\times\text{м}$, того ж порядку механічну міцність та робочу температуру до 450°C .

1.6. Напівпровідники

Германій має нешироку заборонену зону (при 20°C до 0,72 еВ), власну концентрацію носіїв $2,5\times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ і питомий опір при 20°C – 0,47 $\text{Ом}\times\text{м}$.

Кремній має питомий опір до 2000 $\text{Ом}\times\text{м}$ при ширині забороненої зони 1,2 еВ і власній концентрації основних носіїв до 10^{16} м^{-3} .

1.7. Магнітні матеріали

1.7.1. Магнітом'які матеріали

Електротехнічні сталі є найбільш поширеним матеріалом в трансформаторобудуванні. Найчастіше сталі легують кремнієм, вміст якого може досягати 4,8%. При збільшенні кремнію відбувається зростання магнітної проникності, зменшення H_c , ρ і, відповідно, зменшення втрат на гістерезис та на вихрові струми. Проте погіршуються показники механічних властивостей внаслідок зростання крихкості.

Згідно з ГОСТ 21427.0-75 електротехнічні сталі можуть підрозділятися на три групи, за якими відбувається маркування сталей: за структурним станом і видом прокатки на класи (перша цифра в маркуванні):

- гарячекатана ізотропна;
 - холоднокатана ізотропна;
 - холоднокатана анізотропна з ребровою текстурою;
- за масовою часткою кремнію (друга цифра в марці):

0 – з масовою часткою кремнію до 0,4% включно (нелегована); 1 – з масовою часткою кремнію від 0,4 до 0,8% включно;

2 – з масовою часткою кремнію від 0,8 до 1,8% включно; 3 – з масовою часткою кремнію від 1,8 до 2,8% включно;

4 – з масовою часткою кремнію від 2,8 до 3,8% включно; 5 – з масовою часткою кремнію від 3,8 до 4,8% включно. за основною нормованою характеристикою на групи (третья цифра в марці):

0 – питомі втрати при магнітній індукції 1,7 Тл і частоті 50 Гц; 1 – питомі втрати при магнітній індукції 1,5 Тл і частоті 50 Гц;

2 – питомі втрати при магнітній індукції 1,0 Тл і частоті 400 Гц для гарячекатаної або холоднокатаної ізотропної сталі і питомі втрати при магнітній індукції 1,5 Тл і частоті 400 Гц для холоднокатаної анізотропної сталі;

– магнітна індукція в слабких магнітних полях при напруженості поля 0,4 А/м;

– магнітна індукція в середніх магнітних полях при напруженості поля 10 А/м.

четверта цифра в марці відповідає порядковому номеру типу сталі.

Приклад: 1521 – 1 – гарячекатана ізотропна; 5 – з масовою часткою кремнію від 3,8 до 4,8% включно; 2 – нормується за питомими втратами при магнітній індукції 1,0 Тл і частоті 400 Гц; 1 – порядковий номер типу сталі.

Пермалой розділяють на високонікелеві (78-80% Ni) та низьконікелеві (40–65% Ni). Вони характеризуються легким намагнічуванням, високим μ (у високонікелевих до 1500000, у низьконікелевих до 60000); невеликими втратами на гістерезис і низькими значеннями коерцитивної сили (до 30 А/м). Їх недоліками є висока вартість, підвищена чутливість магнітних властивостей до механічних впливів, необхідність термообробки після кожної механічної обробки.

Магнітом'які ферити (магнітна кераміка) відрізняються високою

магнітною проникністю (від 400 до 20000) і високими $\rho_v=10^2\text{--}10^{11}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, що дозволяє їх використовувати у полях до 300 МГц при температурах від 70°C до 180°C.

Магнітодіелектрики є пластмасою з магнітом'яким наповнювачем. Для них $\epsilon=15\text{--}25$. Граничні частоти для магнітодіелектриків на базі карбонільного заліза – до 100 МГц. Робоча температура від -60°C до +100°C.

Магнітотверді матеріали – матеріали для виготовлення постійних магнітів. За способом виготовлення поділяються на:

- литі;
- порошкові (металокерамічні, металопластичні, оксифери і мікропорошки);
- пластично деформовані. Їх коерцитивна сила H_c коливається від 50 до 150 кА/м (у рідкоземельних до 700 кА/м) при залишковій індукції B_r від 0,3 до 1,5 Тл.

1.8. Послідовність виконання роботи

1.8.1. Розглянути зовнішній вигляд матеріалів, розташованих на стендах:

- на першому – полімери (або смоли), які мають лінійну будову;
- на другому – термореактивні матеріали та їх характеристики;
- на третьому – провідникові, напівпровідникові і магнітні матеріали.

1.8.2. Описати основні особливості зовнішнього вигляду та властивості всіх розглянутих груп матеріалів.

1.9. Обробка експериментальних даних

На зразках, які вкаже викладач, визначити види матеріалів і дати характеристику їх властивостям, визначити призначення.

1.10. Зміст звіту

1.10.1. Мета та програма роботи.

1.10.2. Порядок виконання самостійної роботи.

1.10.3. Описати основні особливості зовнішнього вигляду та властивостей усіх розглянутих груп матеріалів.

1.10.4. Висновки за результатами виконаної роботи.

1.10.5. Список використаної літератури.

1.11. Контрольні питання

1.11.1. Фізико-хімічні і механічні властивості діелектриків. Вологісні властивості, механічні властивості, теплові властивості; хімічні властивості діелектриків і дія на них випромінювання високих енергій.

1.11.2. Газоподібні діелектрики.

1.11.3. Нафтові електроізоляційні мастила.

1.11.4. Синтетичні рідкі діелектрики.

1.11.5. Органічні полімери, синтетичні і природні смоли, пластмаси,

еластоміри.

1.11.6. Скло.

1.11.7. Керамічні та діелектричні матеріали, фарфор, сегнетокераміка, слюдяні матеріали, азбестові матеріали.

1.11.8. Магнітом'які, магнітотверді та магнітні матеріали спеціального призначення.

1.11.9. Провідникові матеріали, класифікація, матеріали високої провідності, надпровідники, кріопровідники, неметалеві провідники.

1.11.10. Напівпровідникові матеріали. Вплив зовнішніх факторів на їх провідність.

САМОСТІЙНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ПОЛЯРИЗАЦІЇ ТА ВТРАТ В ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛАХ

2.1. Мета роботи

Провести комп'ютерне моделювання та дослідити вплив температури на явище поляризації та величину діелектричних втрат в діелектриках. Ознайомитись з методикою визначення їх відносної діелектричної проникності.

2.2. Основні теоретичні відомості

Для будь-якого діелектрика характерним процесом, що виникає при дії на нього електричного поля, є поляризація – обмежений зсув зв'язаних зарядів або орієнтація дипольних молекул.

Про явища, зумовлені поляризацією діелектрика, можна судити за значенням діелектричної проникливості, а також кута діелектричних утрат, якщо поляризація діелектрика супроводжується розсіюванням енергії, що викликає нагрівання діелектрика. У нагріванні технічного діелектрика можуть брати участь нечисленні вільні заряди, які зумовлюють виникнення під впливом електричного поля малого наскрізного струму.

Під впливом електричного поля зв'язані електричні заряди діелектрика зміщуються в напрямку діючих на них сил і тим більше, чим вища напруженість поля. При знятті електричного поля заряди повертаються в початковий стан. У полярних діелектриках, що містять дипольні молекули, вплив електричного поля викликає орієнтацію диполів, при відсутності поля диполі знаходяться в тепловому русі.

Більшість діелектриків характеризується лінійною залежністю електричного зміщення від напруженості електричного поля, створеного в діелектрику. Особливу групу складають діелектрики, у яких зі зміною напруженості поля електричне зміщення залежить нелінійно. Такі діелектрики називаються сегнетоелектриками. Назва “сегнетоелектрик” пов'язана з тим, що нелінійність поляризації вперше була виявлена в сегнетовій солі.

Будь-який діелектрик з нанесеними на нього електродами і включений в електричне коло, можна уявити як конденсатор певної ємності (рис. 2, а).

Заряд конденсатора визначається:

$$Q = C \cdot U, \quad (2.1)$$

де C – ємність конденсатора; U – прикладена до нього напруга.

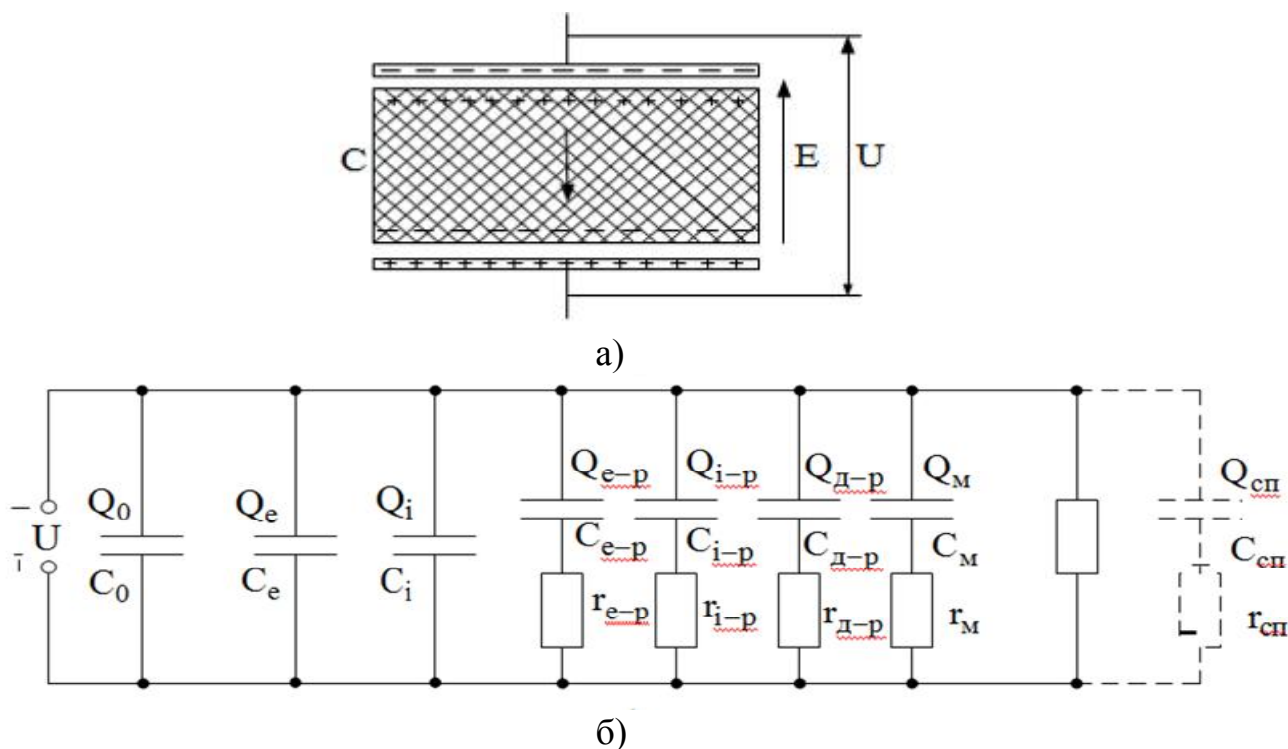


Рис. 2.1 Діелектрик складної сполуки з різними механізмами поляризації в електричному полі (а) та еквівалентна схема його заміщення (б)

Заряд конденсатора Q при заданому значенні прикладеної напруги складається з двох складових: Q_0 – заряду, коли між пластинами конденсатора є вакуум, і Q_d – заряду конденсатора з діелектриком:

$$Q = Q_0 + Q_d. \quad (2.2)$$

Однією з найважливіших характеристик діелектрика є відносна діелектрична проникність.

Ця величина являє собою відношення заряду, отриманого при деякій напрузі на конденсаторі, що містить даний діелектрик, до заряду конденсатора тих же розмірів, якби між пластинами був вакуум:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}. \quad (2.3)$$

З виразу (2.3) випливає, що відносна діелектрична проникність будь-якої речовини більше одиниці і дорівнює одиниці тільки у випадку вакууму.

Співвідношення (2.1), наведене вище, може бути подане у вигляді:

$$Q = Q_{0\varepsilon} = CU \cdot C_0 U_\varepsilon, \quad (2.4)$$

де C_0 – ємність конденсатора, коли між його пластинами є вакуум.

З формули (2.4) видно, що діелектричну проникність речовини ε можна визначити як відношення ємності конденсатора з даним діелектриком до ємності конденсатора тих же розмірів, діелектриком якого є вакуум.

Поляризація діелектриків залежно від агрегатного стану і структури поділяється на два основних види.

До першого виду відносять поляризацію, що відбувається в діелектрику під впливом електричного поля практично миттєво, пружно, без розсіювання енергії, тобто без виділення тепла. Другий вид поляризації не

відбувається миттєво, а наростає й убиває уповільнено і супроводжується розсіюванням енергії в діелектрику, тобто його нагріванням. Такий вид поляризації називають релаксаційною поляризацією.

До першого виду поляризації відносять електронну та іонну, інші механізми належать до релаксаційної поляризації. Особливим механізмом поляризації є резонансна, що спостерігається в діелектриках при світлових частотах, а тому малоістотна для практичної електротехніки.

Ємність конденсатора з діелектриком і накопичений у ньому електричний заряд обумовлюються сумою різних механізмів поляризації. Вони можуть спостерігатися в різних діелектриках, кілька механізмів одночасно може існувати в одному й тому самому матеріалі.

Еквівалентна схема заміщення діелектрика, у якому існують різні механізми поляризації, містить ряд ємностей, включених паралельно джерелу напруги U , як це показано на рис. 2.1, б.

Ємність C_0 і заряд Q_0 відповідають власному полю конденсатора, якщо між його пластинами є вакуум. Величини C_e і Q_e відповідають електронній поляризації.

Електронна поляризація являє собою пружне зміщення і деформацію електронних оболонок атомів. Час встановлення електронної поляризації (10-15 с). Електронна поляризація спостерігається в усіх видах діелектриків і не пов'язана з втратою енергії.

Іонна поляризація (C_i і Q_i) характерна для твердих тіл з іонною структурою й обумовлена пружним зміщенням зв'язаних іонів. Час встановлення іонної поляризації (10-13 с).

Дипольно-релаксаційна поляризація (C_{d-p} , Q_{d-p} , r_{d-p}) відрізняється від електронної та іонної тим, що вона пов'язана з орієнтацією дипольних молекул, що перебувають в хаотичному русі, під дією електричного поля. Дипольна поляризація характерна для полярних газів і рідин. Цей вид поляризації може спостерігатися також і у твердих полярних органічних речовинах, але в цьому випадку поляризація зумовлена вже не поворотом самої молекули, а поворотом наявних у ній радикалів відносно молекули. Прикладом речовини з цим видом поляризації є целюлоза, полярність якої пояснюється наявністю гідроксильних груп ОН.

У кристалах з молекулярними ґратками і слабкими вандерваальсовими зв'язками можлива орієнтація і більш великих часток.

Іонно-релаксаційна поляризація (C_{i-p} , Q_{i-p} , r_{i-p}) спостерігається в неорганічних речовинах з нещільним упакуванням іонів. У цьому випадку слабо зв'язані іони речовини під дією зовнішнього електричного поля орієнтуються в напрямку поля. З підвищенням температури іонно-релаксаційна поляризація помітно підсилюється.

Електронно-релаксаційна поляризація (C_{e-p} , Q_{e-p} , r_{e-p}) відрізняється від електронної та іонної і виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових (дефектних) електронів або дірок.

Міграційна поляризація (C_m , Q_m , r_m) характерна для твердих тіл неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і наявності

домішок. Ця поляризація виявляється при низьких частотах і пов'язана зі значним розсіюванням електричної енергії. Причинами такої поляризації є провідні і напівпровідні включення в технічних діелектриках, наявність шарів з різною провідністю та інші.

При внесенні неоднорідних матеріалів в електричне поле вільні електрони й іони провідних і напівпровідних включень переміщуються в межах кожного включення, утворюючи великі поляризовані області.

На рис. 2.1 штриховими лініями показані також C_{cn} , Q_{cn} і r_{cn} , що їх відносять до механізму самовільної (спонтанної) поляризації. Цей вид поляризації характерний для сегнетоелектриків. У речовинах з самовільною поляризацією є окремі області (домени), що мають діелектричний момент при відсутності зовнішнього поля. Орієнтація електричних моментів у різних доменах різна. Накладення зовнішнього поля сприяє переважній орієнтації електричних моментів доменів у напрямку поля, що дає ефект дуже сильної поляризації. На відміну від інших видів поляризації при деякому значенні напруженості зовнішнього поля настає насичення і не приводить до зростання інтенсивності поляризації. Тому діелектрична проникність при спонтанній поляризації залежить від напруженості електричного поля. У температурній залежності спостерігається один або кілька максимумів. У змінних електричних полях матеріали з самовільною поляризацією характеризуються значним розсіюванням енергії.

Залежно від виду поляризації всі діелектрики діляться на кілька груп. До першої групи можна віднести діелектрики, яким характерна в основному, тільки електронна поляризація, наприклад, неполярні і слабополярні тверді речовини в кристалічному і аморфному станах (парафін, сірка, полістирол), а також неполярні і слабополярні рідини і гази (бензол, водень і ін.).

До другої групи належать діелектрики, що мають одночасно електронну і дипольно-релаксаційну поляризацію. До них належать полярні (дипольні) органічні, напіврідкі і тверді речовини (масляно-каніфольні компаунди, епоксидні смоли, целюлоза, деякі хлоровані вуглеводні та інші).

Третю групу складають тверді неорганічні діелектрики з електронною, іонною та іонно-електронно-релаксаційними поляризаціями. У цій групі доцільно виділити дві підгрупи матеріалів через істотне розходження їхніх електричних характеристик: діелектрики з електронною та іонною поляризаціями, діелектрики з електронною, іонною й релаксаційними поляризаціями. До першої переважно відносять кристалічні речовини з щільним упакуванням іонів (кварц, слюда, кам'яна сіль, корунд, рутил). До другої належать неорганічне скло, матеріали, що містять склоподібну фазу (порцеляна, мікалекс), та кристалічні діелектрики з нещільним упакуванням іонів у ґратках.

Четверту групу складають сегнетоелектрики, що характеризуються спонтанною, електронною, іонною та електронно-іонно-релаксаційною поляризаціями: сегнетова сіль, метатитанат барію та інші.

Наведена вище класифікація діелектриків дозволяє визначати їх основні електричні властивості.

Діелектричні втрати – важливий параметр діелектрика. Діелектричні втрати призводять до нагрівання діелектрика, а зміна температури – призводить до старіння матеріалу, що, звісно, у свою чергу, призводить до скорочення терміну служби обладнання.

Діелектричні втрати за їх особливостями і фізичною природою можна розділити на чотири основних види:

- діелектричні втрати, обумовлені поляризацією;
- діелектричні втрати наскрізної електропровідності;
- іонізаційні діелектричні втрати;
- діелектричні втрати, обумовлені неоднорідністю структури.

Перший вид – особливо чітко спостерігається у речовинах, що мають релаксаційну поляризацію: в діелектриках дипольної та іонної структури з нещільним упакуванням іонів. Релаксаційні діелектричні втрати викликають порушення теплового руху частинок під впливом електричного поля. Це порушення призводить до розсіювання енергії і нагрівання діелектрика.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках пов'язані з явищем спонтанної поляризації. Втрати в сегнетоелектриках є значними при температурі, нижчій точки Кюрі; при температурі, більшій точки Кюрі, втрати в сегнетоелектриках зменшуються. Резонансні втрати теж обумовлені поляризацією, проявляються в деяких газах при чітко визначеній частоті.

Другий вид – характерний для діелектриків, що мають змінну електропровідність (об'ємну чи поверхневу). Діелектричні втрати зростають з підвищенням температури за експоненціальним законом.

$$P_T = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \quad (2.5)$$

де A , b – постійні матеріалу.

Наближений вираз:

$$P_T = P_0 \cdot e^{\alpha t}, \quad (2.6)$$

де P_T – втрати при певній температурі t °C; P_0 – втрати при $t^\circ = 0^\circ\text{C}$; α – постійна матеріалу.

Третій вид – властивий діелектрикам у газоподібному стані. Іонізаційні втрати проявляються в неоднорідних електричних полях при напруженостях, що перевищують значенням початку іонізації даного газу.

Іонізаційні втрати обчислюються за формулою:

$$P_i = A_i \cdot f \cdot (U - U_0)^3, \quad (2.7)$$

де A_i – постійний коефіцієнт; f – частота електричного поля; U – прикладена напруга; U_0 – напруга, що відповідає початку іонізації.

Формула справедлива при $U > U_0$ і лінійній залежності $\tan \delta$ від E . U_0 залежить від тиску, оскільки розвиток ударної іонізації молекул залежить від довжини вільного пробігу носіїв заряду. Таким чином, із збільшенням тиску газу величина напруги початку іонізації зростає.

Четвертий вид – спостерігається у діелектриках із просоченого паперу і тканини, у пластмасах з наповнювачем, в пористій кераміці та слюді.

Оскільки структура неоднорідних діелектриків і їх компонентів є досить різною, то не існує загальної формули розрахунку діелектричних втрат у цьому випадку.

Якщо напруженість поля менше напруженості, необхідної для початку ударної іонізації молекул газу, то діелектричні втрати в газах дуже малі, і гази у цьому випадку розглядаються як ідеальний діелектрик.

На рис. 2.2 наведена залежність $\operatorname{tg} \delta$ ($f(U)$) для газової ізоляції.

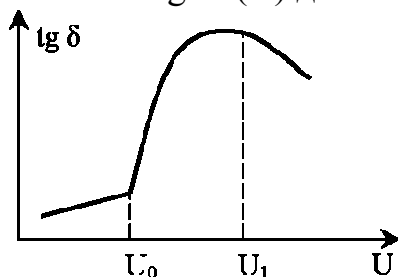


Рис. 2.2 Іонізаційна характеристика ізоляції

При напрузі U_0 відбувається початок іонізації газу, а при напрузі U_1 газ уже іонізований і енергія на процес іонізації не витрачається.

На лініях електропередачі високої напруги втрати на іонізацію повітря біля поверхні провідників понижують коефіцієнт її корисної дії. У неполярних рідинах електричні втрати зумовлені лише електропровідністю, якщо рідина не має домішок з дипольними молекулами (наприклад, очищене нафтове конденсаторне масло).

Полярні рідини (наприклад, совол) від умов температури, частоти можуть мати досить великі діелектричні втрати, пов'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією, крім втрат, зумовлених електропровідністю.

У техніці використовуються рідкі діелектрики, що являють собою суміші неполярних і полярних речовин (наприклад, масляно-каніфольні компаунди).

При підвищенні частоти ω максимум $\operatorname{tg} \delta$ зміщується в область більш високої температури: більша частота потребує меншого часу релаксації, необхідного для отримання максимуму кута втрат δ , а для зменшення часу релаксації необхідне зниження в'язкості, тобто підвищення температури.

Час релаксації – час, за який впорядкованість зорієнтованих електричним полем диполів після зняття поля зменшується за рахунок наявності теплового руху в $e = 2,7$ раза від початкового значення.

На рис. 2.3 показані області, що характеризують:

- якщо в'язкість речовини велика, (при малих t°), то молекули не встигають зорієнтуватися при змінні поля і дипольно-релаксаційна поляризація зникає – $\operatorname{tg} \delta$ малий (початок кривих);
- при середніх в'язкостях дипольні втрати можуть бути суттєві і при деякому значенні в'язкості мають максимум;
- дипольні втрати будуть такими малими, коли орієнтація молекул відбувається без тертя (мінімум кривої);
- подальший ріст $\operatorname{tg} \delta$ з підвищенням t° пояснюється ростом

електропровідності (за рахунок діелектричних втрат наскрізної електропровідності).

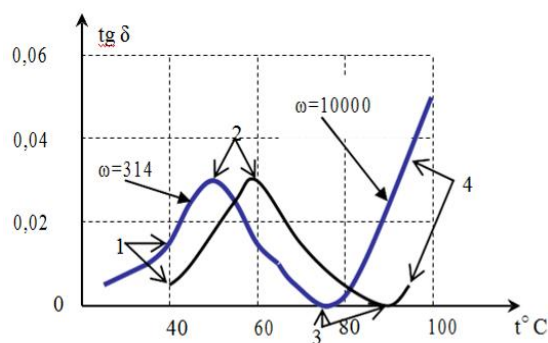


Рис. 2.3 Залежність $\operatorname{tg} \delta$ від t °C при різних частотах для масляно-каніфольного компаунда

Діелектричні втрати в твердих діелектриках розглядають залежно від їх структури. За структурою тверді діелектрики поділяються на 4 групи:

- діелектрики молекулярної структури;
- діелектрики іонної структури;
- сегнетоелектрики;
- діелектрики неоднорідної структури.

Діелектричні втрати в діелектриках молекулярної структури.

Якщо молекули – неполярні, а речовини не мають домішок, то діелектричні втрати дуже-дуже малі (сіра, парафін, неполярні полімери – поліетилен, політетрафторетилен, полістирол і інші). Тому ці речовини використовуються як якісні високочастотні діелектрики.

Діелектрики молекулярної структури з полярними молекулами головним чином є органічними речовинами (речовини на базі целюлози – папір, картон та інші); полярні полімери (поліетилметакрилат, органічне скло); поліаміди (капрон та інші); поліуретани, каучукові матеріали (ебоніт); фенолоформальдегідні смоли (бекаліт та інші); ефіри целюлози (ацетил-целюлоза та інші) і низка інших матеріалів.

Усі вони завдяки дипольно-релаксаційній поляризації мають великі діелектричні втрати (рис. 2.4), які суттєво залежать від температури (при деяких температурах визначаються максимум і мінімум втрат, ріст втрат після мінімуму пояснюється збільшенням втрат наскрізної провідності).

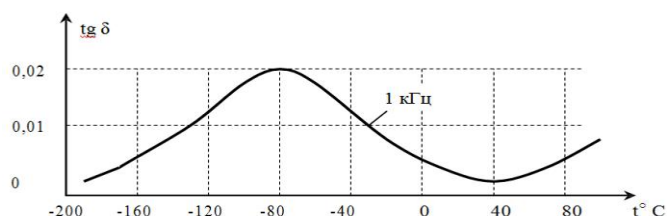


Рис. 2.4 Залежність $\operatorname{tg} \delta$ від температури для висушеного паперу

Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури. У речовинах кристалічної структури зі щільним упакуванням іонів при

відсутності домішок діелектричні втрати досить малі. При підвищених температурах в таких речовинах з'являються втрати від наскрізної електропровідності, наприклад, у кам'яній солі та інших.

Речовини з кристалічною структурою з нещільним упакуванням іонів характеризуються релаксаційною поляризацією, що викликає підвищені діелектричні втрати. Для більшості видів електрокераміки кількість іонів релаксаційної поляризації безперервно зростає з ростом температури, максимум $\text{tg } \delta$ відсутній (рис. 2.5).

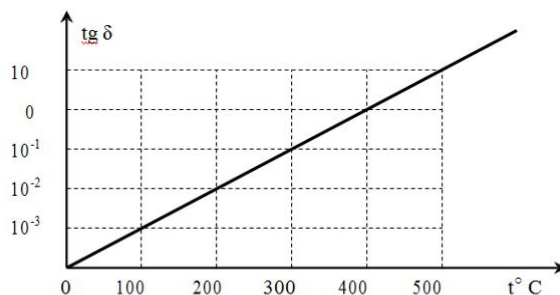


Рис. 2.5 Температурна залежність $\text{tg } \delta$ титанової кераміки при $f = 50$ Гц

Діелектричні втрати в аморфних речовинах іонної структури (неорганічне скло) пов'язані з поляризацією та наявністю електропровідності.

Втрати мало залежать від t° і зростають прямо пропорційно частоті. Такі втрати зумовлені релаксаційною поляризацією і суттєво виражені в технічному склі. Термічна обробка помітно впливає на кут діелектричних втрат скла у зв'язку зі зміною його структури.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках. Їх особливість — наявність самовільної поляризації, що з'являється в певному температурному інтервалі до точки Кюрі.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках мало змінюються з температурою в області спонтанної поляризації і різко падають при температурі $t^\circ\text{C}$, більшій точки Кюрі, коли сегнетоелектричні властивості втрачаються.

Діелектричні втрати у твердих речовинах неоднорідної структури. Це матеріали, до складу яких входять не менше двох компонентів, механічно пов'язаних між собою, наприклад, кераміка. У складі кераміки розрізняють кристалічну, скловидну фазу і газові включення у закритих порах. Газові включення приводять до збільшення діелектричних втрат при високих напруженостях поля внаслідок розвитку іонізації.

Просочений папір також слід віднести до діелектриків з неоднорідною структурою. Його діелектричні втрати визначаються електричними властивостями обох компонентів, їх кількісним співвідношенням і залишковими повітряними включеннями.

На рис. 2.6 показана залежність $\text{tg } \delta$ від $t^\circ\text{C}$ для конденсаторного паперу. Вона має два максимуми: перший (при низьких температурах) характеризує дипольно-радикальні втрати самого паперу (целюлози), другий (при більш високій температурі), обумовлений дипольно-релаксаційними

втратами просочувального компаунда.

У сучасній електроізоляційній техніці неоднорідні діелектрики мають досить широке використання.

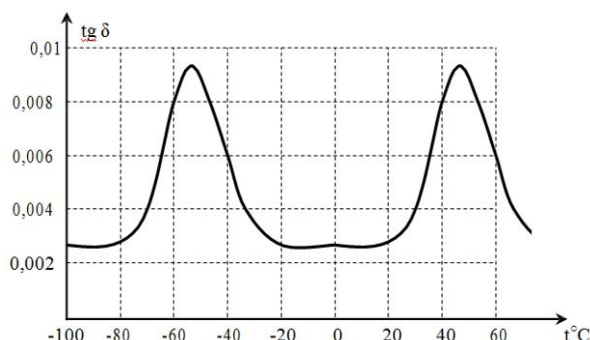


Рис. 2.6 Залежність $\text{tg } \delta$ від t $^{\circ}\text{C}$ для конденсаторного паперу, просоченого компаундом (80% каніфолі, 20% трансформаторного масла)

2.3. Послідовність виконання роботи

2.3.1. Активізувати комп'ютерну програму “Самостійна робота № 2” (“Дослідження явища поляризації та втрат в діелектричних матеріалах”).

2.3.2. Увімкнути віртуальні “Міст змінного струму Р5079” та “Вимірювач температури” (рис. 2.7).

2.3.3. Помістити площинний конденсатор зі зразком досліджуваного діелектрика в термостат. Для цього необхідно “мишкою” активізувати позицію “Папір конденсаторний” в таблиці “Вибір діелектрика”.

2.3.4. Увімкнути “Термостат”.

2.3.5. Виміряти величини електричної ємності C та тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta$ досліджуваного зразка діелектрика залежно від температури t $^{\circ}\text{C}$. Температуру змінювати в інтервалі від 20 $^{\circ}\text{C}$ до 120 $^{\circ}\text{C}$ через кожні 10 $^{\circ}\text{C}$.

2.3.6. Результати вимірювань занести до таблиці 2.1.

2.3.7. Вимкнути “Термостат”.

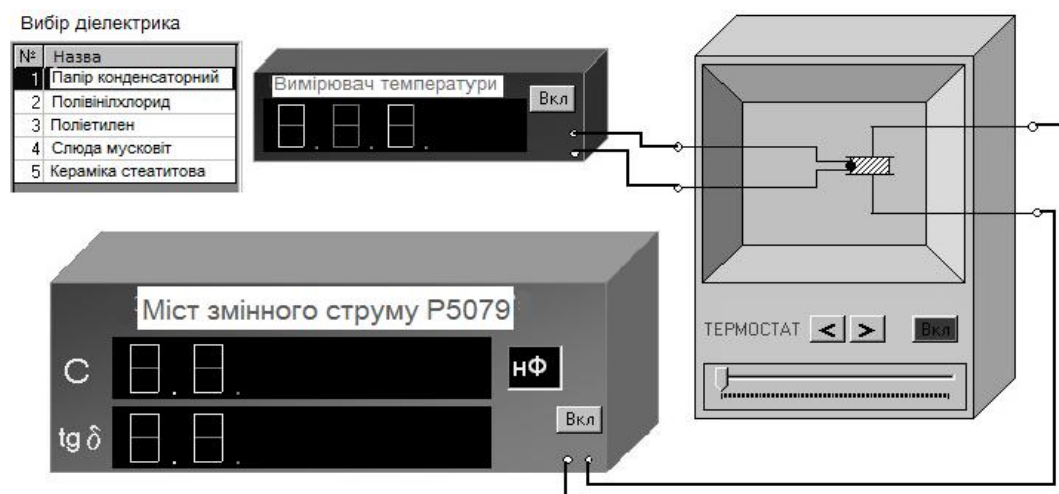


Рис. 2.7. Схема дослідної установки

2.3.8. Повторити пп. 2.3.3–2.3.6 для зразків інших діелектриків:

полівінілхлориду; поліетілену; слюди мусковіт; кераміки стеатитової.

Результати вимірювань занести до таблиці

2.1. Таблица

Дані дослідів та розрахунків

	t, °C	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Папір конденсаторний	C, нФ											
	tg δ											
	ε											
Полівінілхлорид	C, нФ											
	tg δ											
	ε											
Поліетілен	C, нФ											
	tg δ											
	ε											
Слюда мусковіт	C, нФ											
	tg δ											
	ε											
Кераміка стеатитова	C, нФ											
	tg δ											
	ε											

2.4. Обробка експериментальних даних

2.4.1. За формулами, наведеними в таблиці 2.2, розрахувати відносні діелектричні проникності ϵ для різних зразків досліджуваних діелектричних матеріалів. Результати розрахунків занести до табл. 2.1 Параметри зразків наведені в табл. 2.2.

2.4.2. За результатами вимірювань побудувати в одній системі координат функціональні залежності ємності C конденсатора від температури $C = f(t^0)$ з кожним із досліджуваних діелектриків.

2.4.3. За результатами розрахунків п. 2.3.1 побудувати в одній системі координат функціональні залежності відносної діелектричної проникності від температури $\epsilon = f(t^0)$.

Таблиця 2.2

Результати розрахунків

Зразок	Площа обкладок конденсатора S , мм ²	Товщина діелектрика d , мкм	Розрахункова формула	Примітка
Папір конденсаторний	12x125	20	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$, де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м	Конденсатор рулонного типу 
Полівінілхлорид	20x30	200	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$,	Конденсатор площинного типу
Поліетилен	10x120	4	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$,	Конденсатор рулонного типу 
Слюда мусковіт	12x12	50	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$,	Конденсатор секційного типу 
Кераміка стеатинова			$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$,	Конденсатор циліндричний 

2.4.4. За результатами вимірювань побудувати в одній системі координат функціональні залежності тангенса кута діелектричних втрат у досліджуваних діелектриках від температури $\operatorname{tg} \delta = f(t_o)$.

2.4.5. Зробити висновки.

2.5. Зміст звіту

2.5.1. Назва та мета самостійної роботи.

2.5.2. Порядок виконання самостійної роботи.

2.5.3. Таблиці з виміряними та розрахованими даними.

2.5.4. Графіки залежностей.

2.5.5. Результати розрахунків.

2.5.6. Висновки за результатами виконаної роботи.

2.5.7. Список використаної літератури.

2.6. Контрольні питання

2.6.1. Назвіть діелектричні матеріали, які використовують при

виготовленні елементної бази електронної апаратури.

2.6.2. Дайте означення поляризації діелектриків.

2.6.3. Назвіть види поляризації.

2.6.4. Що таке діелектрична проникність?

2.6.5. Дайте означення втрат в діелектриках.

2.6.6. Що таке тангенс кута діелектричних втрат?

2.6.7. Дайте означення конденсатора.

САМОСТІЙНА РОБОТА № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМНОГО ТА ПОВЕРХНЕВОГО ПИТОМИХ ОПОРІВ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

3.1. Мета роботи

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

3.2. Основні теоретичні відомості

Практично всі електроізоляційні матеріали (діелектрики) під дією електричної напруги пропускають деякий (зазвичай дуже малий) струм, тобто не є ідеальними через наявність деякої електропровідності. Електропровідність твердих діелектриків пояснюється наявністю в 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 лише в їх об'ємах, а й у тонкому шарі вологи та різних забруднень на їхній 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 обернені відносно відповідних питомих електропровідностей. З курсу фізики відомо, що питома електропровідність γ залежить від концентрації вільних зарядів n , їх рухливості u і величини заряду q :

$$\gamma = q \cdot n \cdot u \quad (3.1)$$

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 лише незначною концентрацією в них вільних зарядів.

Поверхнева провідність обумовлюється здатністю діелектрика адсорбувати на своїй поверхні вологу і пил, 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 вологи і забруднюючих речовин, і тому питомий поверхневий опір ρ_s такого діелектрика значно більший, ніж питомий поверхневий опір 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 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 опорів діелектрики умовно розділяються на: високоякісні – $\rho_v=10^{13}...10^{16}$ Ом·м, $\rho_s=10^{14}...10^{16}$ Ом; якісні – $\rho_v=10^9...10^{12}$ Ом·м, $\rho_s=10^{10}...10^{13}$ Ом; задовільні – $\rho_v=10^6...10^8$ Ом·м, $\rho_s=10^8...10^9$ Ом.

Поляризаційні процеси викликають у діелектриках протікання поляризаційних струмів. Ці струми називають струмами абсорбції ($i_{аб}$). При постійній напрузі вони протікають в моменти включення і відключення джерела живлення, а при змінній напрузі – вони мають місце протягом усього часу знаходження діелектрика в електричному полі.

Наявність в технічних діелектриках невеликої кількості вільних зарядів приводить до виникнення слабких за величиною наскрізних струмів ($i_{нк}$):

$$i = i_{нк} + i_{аб}, \quad (3.2)$$

де $i_{аб}$ – струм абсорбції (поляризації); $i_{нк}$ – наскрізний струм.

Як видно з (рис. 3.1), після завершення поляризації через діелектрик протікає тільки наскрізний струм.

Дійсний опір діелектрика буде дорівнювати:

$$R_d = \frac{U}{i - \sum i_n} = \frac{U}{i_{нк}}, \quad (3.3)$$

де U – напруга; i – струм, що спостерігається; $i_{нк}$ – наскрізний струм; $\sum i_n = i_{аб}$ – сума струмів, обумовлених поляризацією.

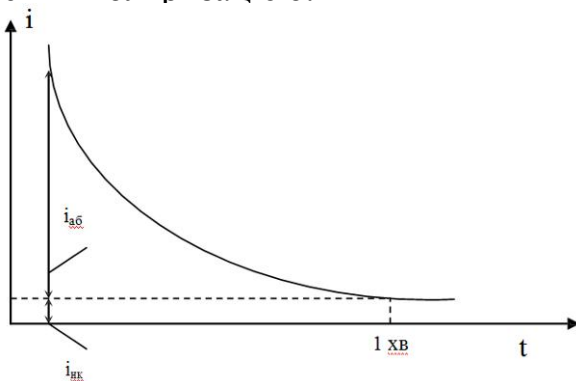


Рис. 3.1 Залежність струму, що протікає через діелектрик, від часу

Електропровідність діелектрика характеризується питомою поверхневою (ρ_s) і питомою об'ємною (ρ_v) провідностями.

У системі Сі питомий об'ємний опір (ρ_v) дорівнює опору кубу з ребром в 1 м, подумки вирізаного з досліджуваного матеріалу, якщо струм

проходить крізь куб від однієї грані до протилежної.

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

$$\rho_v = \frac{R \cdot S}{h} \quad (3.4)$$

де R – об'ємний опір зразку (Ом); S – площа електрода (м^2); h – товщина зразка (м).

Питома об'ємна провідність γ вимірюється в $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$.

Питомий поверхневий опір – опір квадрата будь-яких розмірів подумки виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через квадрат від однієї його сторони до протилежної.

Питомий поверхневий опір:

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{l} \quad (3.5)$$

де R_s – поверхневий опір зразка матеріалу (Ом); d – ширина електродів; l – відстань між електродами; ρ_s – розраховується в (Ом).

Добуток опору ізоляції діелектрика конденсатора і його ємності прийнято називати постійною часу τ_0 саморозрядження конденсатора:

$$\tau_o = R_d \cdot C; \quad (3.6)$$

$$U = U_o \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{\tau_0}\right)} \quad (3.7)$$

де U – напруга на електродах конденсатора через час η після відключення його від джерела напруги; U_o – напруга, до якої був заряджений конденсатор ($\eta = 0$); R_o – опір ізоляції діелектрика (опір наскрізному струму); C – ємність конденсатора.

Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля мають винятково малу провідність. Якщо іонізація нейтральних молекул газу виникає під дією зовнішніх факторів (рентгенівські промені, ультрафіолетові промені, космічні промені, радіоактивне випромінювання, термічні дії нагрівання газу), то така електропровідність газу називається несамостійною, а якщо за рахунок ударної іонізації – самостійною. Одночасно частина додатних іонів з'єднується з від'ємними частинками і утворюються нейтральні молекули. Такий процес називається рекомбінацією. Рекомбінація обмежує ріст кількості іонів в газі.

3.3. Послідовність виконання роботи

3.3.1. Вивчення інформації про електропровідність діелектриків. Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної самостійної 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 електропровідностями або, що найчастіше, питомим об'ємним ρ_v та поверхневим ρ_s опорами.

3.3.2. Вивчення тераомметра – прилада для вимірювання об'ємного та

поверхневого опорів твердих діелектриків.

Користуючись рекомендованою літературою та методичними вказівками до даної самостійної роботи, вивчити принцип дії тераомметра. Звернути особливу увагу на схеми вмикання електродів вимірювального прилада, 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.

3.3.3. Вимірювання об'ємного опору зразків діелектриків.

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

- виміряти і записати у табл. 3.1 значення діаметра d вимірювального електрода В та внутрішнього діаметра D охоронного електрода О;
- виміряти і записати в табл. 3.1 значення товщини h зразків твердих діелектриків, які запропоновані викладачем для досліджень;
- зібрати схему згідно з рис. 3.2;
- виміряти об'ємний опір R_v зразків, користуючись першою чи другою шкалою приладу, і занести результати в табл. 3.1.

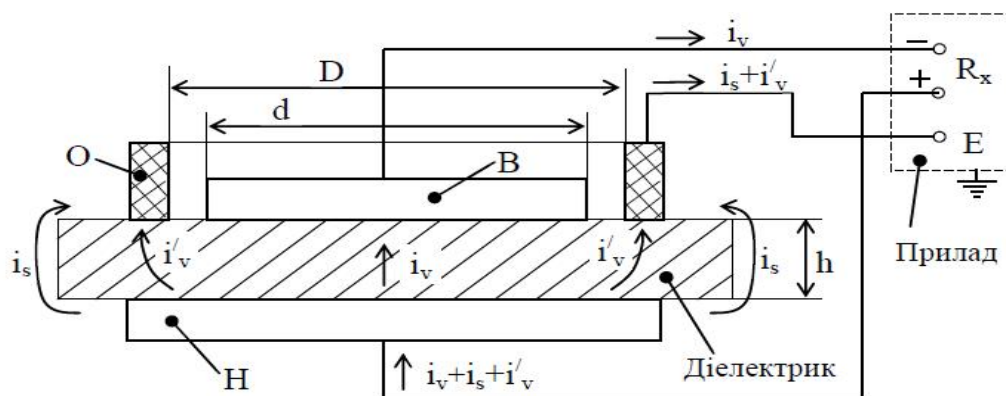


Рис. 3.2 Схема підключення електродів для вимірювання об'ємного опору твердого діелектрика

Таблиця 3.1

Результати вимірів та розрахунків

Діелектрик	Виміряно					Обчислено		
	$d, \text{м}$	$D, \text{м}$	$h, \text{м}$	$R_v, \text{Ом}$	$R_s, \text{Ом}$	$\rho_v, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_s, \text{Ом}$	$n, \text{м}^{-3}$

3.3.4. Вимірювання поверхневого опору зразків діелектриків.

Вимірювання поверхневих опорів зразків твердих діелектриків проводити у такій послідовності: зібрати схему згідно з рис. 3.3; вимірити поверхневий опір R_s зразків, користуючись першою чи другою шкалою приладу, і занести результати в табл. 3.1.

Вимірювання опорів діелектриків необхідно проводити при постійній

напрузі, оскільки при змінній напрузі додатково виникає зарядно-розрядний струм, викликаний поляризацією. За цієї причини покази приладу знімають не раніше, ніж через 60 с після подання постійної напруги, оскільки для завершення поляризації необхідний деякий час. Для того, щоб можна було відокремлено зробити вимір об'ємного та поверхневого опорів, використовують три електроди, які називають вимірювальним електродом В, електродом напруги Н та охоронним електродом О.

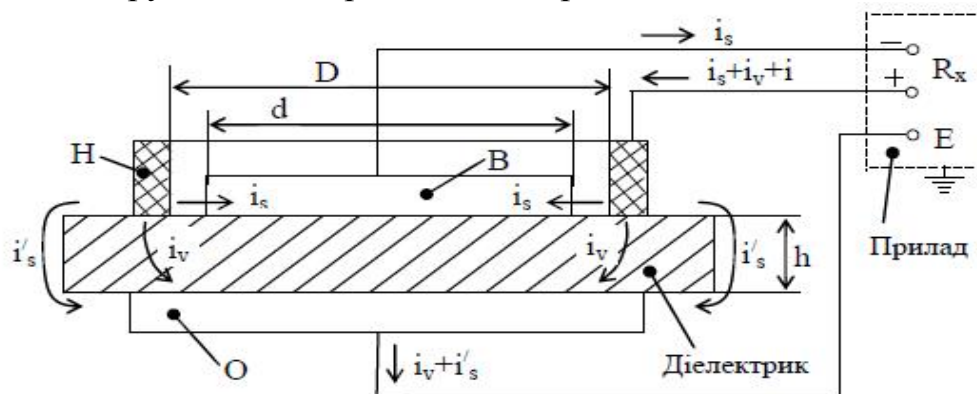


Рис. 3.3 Схема підключення електродів для вимірювання поверхневого опору твердого діелектрика

У схемі вмикання електродів для вимірювання об'ємного опору твердого діелектрика (див. рис. 3.2) струм електропровідності діелектрика, який йде від клем (+) джерела живлення через електрод напруги Н, розгалужується. Перша його частина i_v , яка проходить через вимірювальний електрод В і реєструється вимірювальним 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 О (кільце) на клему Е (екран) вимірювального приладу і тому не реєструється 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 В. Якщо зняти охоронний електрод О зі зразка, то замість струму об'ємної електропровідності і у прилад почне вимірювати суму струмів об'ємної та поверхневої електропровідностей, тобто, покаже менше значення опору. Електрод О також забезпечує практично однорідне електричне поле в зразку між електродами В і Н.

У схемі вмикання електродів для вимірювання поверхневого опору твердого діелектрика (див. рис. 3.3) роль охоронного електрода О виконує нижній електрод – він відводить повз ланцюг вимірювання струмооб'ємної провідності i_v та зовнішній поверхневий струм i'_s . Поверхневий струм i_s , що протікає кільцевим проміжком між електродами В та Н (кільце), вимірюється приладом і визначає розмір поверхневого опору R_s .

Для прямого вимірювання опорів діелектрика використовують

електронні мегомметри, 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 вимірюваний опір R_x вмикається в коло зворотного зв'язку (рис. 3.4).

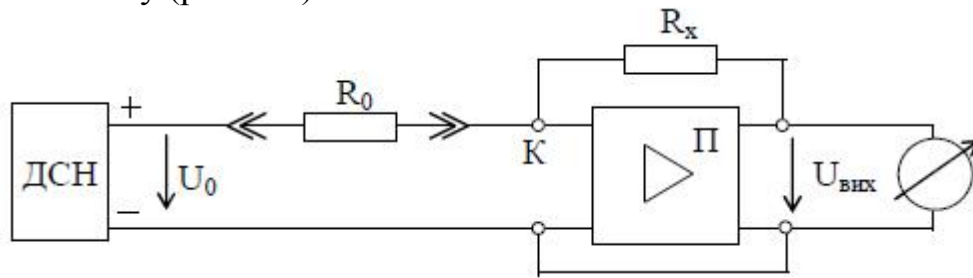


Рис. 3.4 Схема для вимірювання опорів в діапазоні $10 \dots 10^6$ Ом

Вихідна напруга $U_{вих}$, виходячи з рівності струмів у точці К схеми, визначається зі співвідношення:

$$\frac{U_0}{R_0} = \frac{U_{вих}}{R_x} \quad (3.9)$$

Прилад у цьому випадку має пряму лінійну шкалу, тобто вихідна напруга прямо пропорційна вимірюваному опору.

При вимірюванні опорів у діапазоні $10^6 \dots 10^{14}$ Ом використовується схема рис. 3.5, джерело стабільної напруги ДСН і вимірювальний опір R_x , що вмикається вже в пряме коло підсилювача Π , утворюють штучне джерело струму.

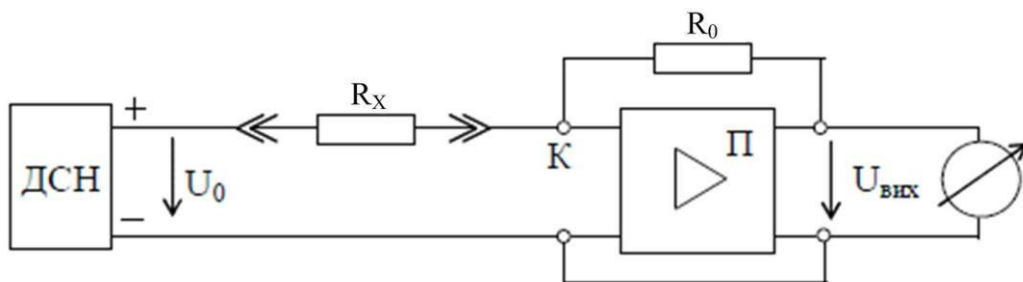


Рис. 3.5 Схема для вимірювання опорів у діапазоні $(10^6 - 10^{14})$ Ом

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

Шкала приладу в цьому випадку є зворотно пропорційною. У приладі використано декілька опорів R_0 , які змінюють діапазон вимірювання.

До комплекту приладу входить вимірювальна камера, що служить екраном. При вимірюванні досліджуваний зразок розміщують усередині

камери, а саму камеру з'єднують з клемою “земля” приладу.

3.4. Обробка експериментальних даних

Обробку експериментальних даних слід проводити у такій послідовності:

3.4.1. Розрахувати питомі об'ємні опори ρ_v зразків діелектриків за формулою (3.3) та результати розрахунків занести у таблицю 3.1. Питомий об'ємний опір діелектрика ρ_v (Ом·м) визначається за формулою:

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h} \quad (3.10)$$

де R_v – об'ємний опір (результат вимірювання, табл. 3.1); $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площа контактної поверхні вимірювального електрода В; d – діаметр вимірювального електрода (результат вимірювання, таблиця 3.1); h – товщина зразка діелектрика (результат вимірювання, таблиця 3.1).

3.4.2. Розрахувати питомі поверхневі опори ρ_s зразків діелектриків за формулою (3.4) та результати розрахунків занести в таблицю 3.1. Питомий поверхневий опір діелектрика ρ_s (Ом) визначається за формулою:

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{L}{g} \quad (3.11)$$

де R_s – поверхневий опір (результат вимірювання, таблиця 3.1); $L = \frac{\pi \cdot (D+d)}{2}$ – ефективний периметр вимірювального електрода В, з якого витікають поверхневі вільні заряди; D – внутрішній діаметр електрода напруги H за схемою рисунка 3.2 (результат вимірювання, таблиця 3.1); $g = \frac{D-d}{2}$ – відстань між вимірювальним електродом В і електродом напруги H , яку долають поверхневі вільні заряди.

3.4.3. Визначити концентрацію вільних зарядів у зразках діелектриків та результати розрахунків занести в табл. 3.1. Концентрацію вільних зарядів у зразках діелектриків можна визначити, виходячи з формули (3.12):

$$n = \frac{1}{\rho_v \cdot q \cdot u}, \quad (3.12)$$

де ρ_v – питомий об'ємний опір (результат розрахунків, табл. 3.1); $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ 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).

3.4.4. Порівняти концентрації вільних зарядів у діелектриках і металах та зробити висновок щодо різниці їх питомих опорів;

3.4.5. На підставі одержаних значень ρ_v і ρ_s зробити висновок про якість досліджених діелектриків.

3.5. Зміст звіту

3.5.1. Назва і мета роботи, порядок виконання роботи.

3.5.2. Схеми рисунків 3.1 і 3.2.

- 3.5.3. Заповнена таблиця 3.1.
- 3.5.4. Розрахунок величин ρ_v , ρ_s , n .
- 3.5.5. Висновки за результатами виконання роботи.
- 3.5.6. Список використаної літератури.

3.6. Контрольні запитання та завдання

- 3.6.1. Чому діелектрики мають ненульову електропровідність?
- 3.6.2. Які види електропровідності можливі в твердих діелектриках?
- 3.6.3. Якими параметрами характеризують діелектрики з точки зору їх електропровідності?
- 3.6.4. Від яких чинників залежить величина питомого об'ємного опору діелектриків?
- 3.6.5. Які чинники впливають на величину питомого поверхневого опору?
- 3.6.6. Чим пояснити різницю в значеннях ρ_v полярних і неполярних діелектриків?
- 3.6.7. За якої напруги (постійної чи змінної) необхідно вимірювати опір діелектриків і чому?
- 3.6.8. Чому при вимірюванні опорів діелектриків необхідна система з трьох електродів?
- 3.6.9. Нарисуйте схему вмикання електродів для визначення питомого об'ємного опору та поясніть призначення кожного її елемента.
- 3.6.10. Нарисуйте схему вмикання електродів для визначення питомого поверхневого опору та поясніть призначення кожного з її елементів.
- 3.6.11. Поясніть, як змінюються покази приладу при вимірюванні опору діелектрика, якщо вимкнути охоронний електрод.
- 3.6.12. Чому покази приладу при вимірюванні опору діелектриків треба фіксувати через деякий інтервал часу після подання напруги на електроди?
- 3.6.13. Поясніть принцип дії тераомметра.

САМОСТІЙНА РОБОТА № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ

4.1. Мета роботи

Вивчити особливості пробую повітряних проміжків в електричному полі промислової частоти при різній формі електродів, одержати дослідні значення електричної міцності повітря в різних проміжках і порівняти отримані значення з теоретичними розрахунками, зробити висновки.

4.2. Основні теоретичні відомості

Явище електричного пробую пов'язане з електронними процесами в діелектрику, що виникають у сильному електричному полі і призводять до раптового (різкого) місцевого зростання щільності електричного струму до моменту пробую. Якщо діелектрик знаходиться в електричному полі і коли його напруженість перевищить критичне значення $E > E_{кр}$, то діелектрик втрачає властивості електроізоляційного матеріалу. Це явище має назву пробую діелектрика або порушення його електричної міцності. Значення напруги, при якій відбувається пробій діелектрика, називається пробивною напругою ($U_{пр}$), а відповідне значення напруженості поля – електричною міцністю діелектрика ($E_{пр}$):

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h} \quad (4.1)$$

де h – товщина діелектрика $[1\text{МВ/м}] = [1\text{кВ/мм}] = [10^6 \text{ В/м}]$. Зовнішньою ізоляцією в багатьох видах електричних конструкцій, наприклад, в трансформаторах, конденсаторах, на лініях електропередачі є повітря. Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика порівняно з $E_{пр}$ рідких і твердих діелектриків.

У газі тепловий рух іонів при накладанні поля отримує деяку додаткову енергію:

$$W = q \cdot U_{\lambda} \quad (4.2)$$

де W – енергія заряджених частинок газу; q – заряд; U_{λ} – падіння напруги на довжині вільного пробігу λ .

При однорідному полі $U_{\lambda} = E \cdot \lambda$, де E – напруженість поля. Тоді:

$$W = q \cdot E_{\lambda} \quad (4.3)$$

Енергія заряджених частинок при зіткненні передається молекулам газу. Якщо вона достатньо велика, відбувається збудження атомів і молекул, пов'язане з переходом електронів на більш віддалену від ядра орбіту, або їх розщеплення на електрони і позитивні іони. При цьому умовою іонізації є:

$$q \cdot E_{\lambda} \geq W_i \quad (4.4)$$

Енергію іонізації W_i часто характеризують іонізаційним потенціалом:

$$U_i = \frac{W_i}{q} \quad (4.5)$$

Іонізаційний потенціал для різних газів знаходиться в межах від 4 до 25 В, що відповідає енергії іонізації від $4 \div 25$ еВ.

При заданих значеннях тиску газу і температури ударна іонізація починається при певному значенні напруженості поля. Ця напруженість поля E називається початковою напруженістю.

Явище пробою газу залежить від ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій. Розглянемо пробій газу в однорідному полі. Однорідне поле можна отримати між плоскими електродами з заокругленими краями, а також між сферами великого діаметра при малій відстані між ними. У такому полі пробій настає миттєво при досягненні певної напруги, що залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, яка потім може перейти у дугу при достатній потужності джерела живлення.

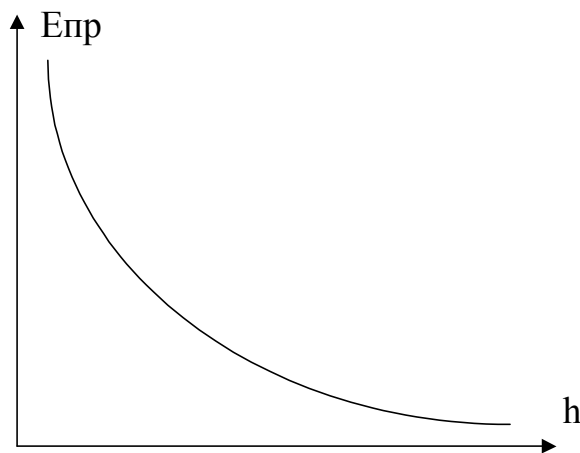


Рис. 4.1 Залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами для однорідного поля

Із графіка видно, що при невеликих відстанях між електродами значно збільшується електрична міцність. Це явище пояснюється важкістю формування розряду при малій відстані між електродами.

У неоднорідному полі пробій газу відрізняються від пробою в однорідному полі. Неоднорідне поле виникає між проводами ліній електропередач, між сферичними поверхнями при відстані між ними, що перевищує радіус сфери. Особливістю пробою газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді корони у місцях, де напруженість поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

Електрична міцність газу досить суттєво залежить від його густини (тобто від тиску, якщо температура постійна). При незначних змінах температури і тиску газу пробивна напруга пропорційна густині газу. У цьому випадку для розрахунків пробивних напруг використовується формула:

$$U_{пр} = \delta \cdot U_{пр0} \quad (4.6)$$

де $U_{\text{пр}}$ – напруга пробою за певної температури і тиску; $U_{\text{пр}0}$ – напруга пробою за нормальних умов: ($t = 20$ с, $p = 0,1$ МПа); δ – відносна густина повітря (за нормальних умов $\delta = 1$) розраховується за формулою:

$$\delta = 0,386 \cdot \frac{p}{t + 273} \quad (4.7)$$

На рис. 4.2 наведена залежність електричної міцності газу від тиску.

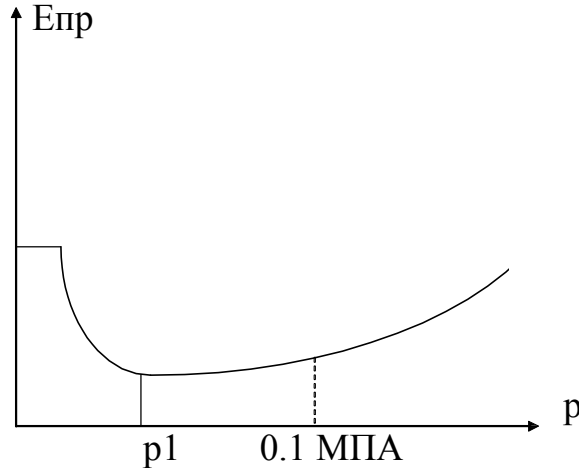


Рис. 4.2 Залежність електричної міцності газу від тиску

При великих значеннях тиску та, відповідно, підвищеній щільності газу відстань між молекулами менша, тому і довжина вільного пробігу електронів теж зменшується, й, згідно з умовою (4.3), для того, щоб відбувся пробій, напруженість поля має бути збільшеною.

При зменшенні тиску спочатку спостерігається падіння електричної міцності, як видно з рисунка, коли тиск доходить до певної межі, нижчої від атмосферного тиску, розрідження газу досягає високого ступеня, електрична міцність зростає. Таке зростання пояснюється зменшенням кількості молекул газу в одиниці об'єму при сильному розрідженні та, відповідно, зниженням імовірності зіткнення електронів з молекулами. У цьому випадку електрична міцність досягає достатньо високих значень. Це явище використовують для конструювання вакуумних вимикачів.

Повітря є природною ізоляцією багатьох електричних конструкцій: трансформаторів, конденсаторів, повітряних вимикачів, ліній передач.

Як діелектрик, повітря має такі позитивні властивості: швидко відновлює свою електричну міцність після пробою, незначно змінює діелектричну проникність, діелектричні втрати повітря практично дорівнюють нулю.

Негативні властивості повітря як діелектрика: погана теплопровідність, низька електрична міцність, різка її зміна біля поверхні твердого діелектрика ($E_{\text{пр}} = 2,19 \dots 2,27$ кВ/мм), здатність зволожуватись, створювати оксиди, підтримувати горіння. Електрична міцність повітря не є постійною величиною і залежить від його тиску, відносної вологості та ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій.

4.3. Послідовність виконання роботи

4.3.1. Ознайомитися зі схемою установки та її монтажним виконанням (рисунок 4.3).

4.3.2. Перевірити положення пристроїв, що регулюють напругу.

4.3.3. Зачинити двері огороження та ввімкнути кнопку пускача.

4.3.4. Плавно змінювати напругу від нуля до пробивного значення.

4.3.5. Записати значення пробивної напруги у табл. 4.1.

4.3.5. Отримати дослідним шляхом залежність пробивної напруги від довжини розрядного проміжку для:

а) електродів куля-куля;

б) електродів “голка – площина”.

Відстань між електродами задає викладач. Особливі умови дотримання техніки безпеки:

а) під час випробувань забороняється заходити за огороження;

б) при регулюванні відстані між електродами слід зняти напругу з трансформаторів і відімкнути схему від мережі;

в) забороняється вимикати схему, не знявши попередньо напругу з випробувального стенда;

г) після кожного виміру треба розрядити установку.

Схема установки для проведення дослідів зображена на рис. 4.3.

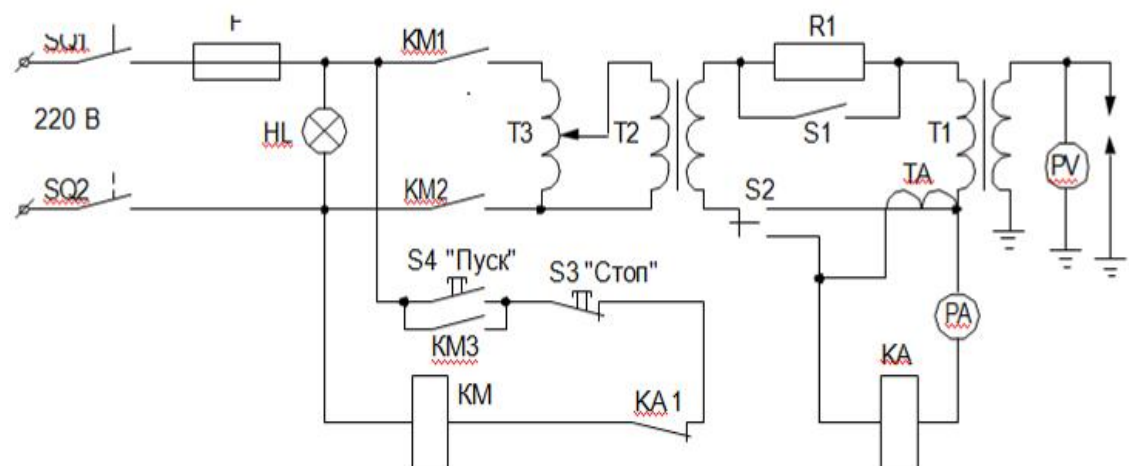


Рис. 4.3 Електрична схема випробувальної установки

Приведена схема містить у собі: високовольтний підвищувальний трансформатор Т1 потужністю 10 кВА, що має номінальні напруги первинної обмотки 350 В і вторинної – 100 кВ, узгоджувальний трансформатор Т2 – 200/350 В; однофазний регулятор напруги (автотрансформатор) Т3, що забезпечує плавне регулювання випробної напруги в межах 0...100 кВ. У колах первинної комутації трансформаторів увімкнені: блок-контакти вимикача SQ1 і SQ2, двері огороження установки, запобіжник F, контакти KM1, KM2 магнітного пускача KM, трансформатор струму ТА, обмежувальний резистор R1, замкнутий при необхідності вимикачем S1. Вторинний ланцюг трансформатора струму містить реле струму КА й амперметр РА, межа вимірювання якого, а також вставку

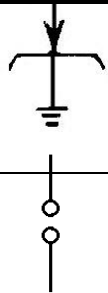
спрацьовування КА (5 чи 50 А) визначаються положенням перемикача S2. Нормально замкнутий контакт КА1, контакти “Пуск” і “Стоп” увімкнені послідовно з котушкою магнітного пускача КМ. Сигналізація замкнутого стану блок-контактів дверей (при справному запобіжнику F) здійснюється за допомогою червоної лампи HL.

Для ввімкнення приладу необхідно закрити двері огороження (замикаються контакти SQ1 і SQ2) і, попередньо перевіривши нульове положення ТЗ, натиснути кнопку S3 “Пуск”. Підйом напруги на випробуваному об'єкті робиться плавним обертанням рукоятки ТЗ у напрямку, зазначеному на пульті.

Перемикач S2 повинний знаходитися в положенні “5А”, а вимикач S1 розімкнутий. Вимірювання досліджуваної напруги проводиться вольтметром PV, повне відхилення стрілки якого відповідає 100 кВ. У випадку перекриття випробуваного об'єкта спрацьовує реле КА, розмикається його контакт КА1, відпадає магнітний пускач КМ, виключаючи своїми контактами КМ1, КМ2 установку від джерела живлення. Для повторного увімкнення установки необхідно ТЗ встановити в нульове положення, а потім повторити перелічені операції.

Таблиця 4.1

Дані дослідів та розрахунків для різних форм електродів

Таблиця 1.1h см	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	Форма електродів
Упр1, кВ									
Епр, кВ/см									
Упр2, кВ									
Епр2, кВ/см									

4.4. Обробка результатів вимірювань

4.4.1. Побудувати графіки $U_{np} = f(h)$; $E_{np} = f(h)$ для двох видів електродів.

4.4.2. Для кульових електродів побудувати розрахункові залежності $U_{np} = f(h)$; $E_{np} = f(h)$ і порівняти їх з отриманими експериментально. При промисловій частоті емпірична формула для обчислення електричної міцності повітря між кульовими електродами має вигляд, кВмакс/см:

$$E_{np} = 2,72 \cdot \delta \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{R \cdot \delta}} \right) \quad (4.8)$$

де δ – відносна густина повітря; R – радіус кулі, см.

За величиною електричної міцності визначають пробивну напругу, кВ:

$$U_{\text{пр.макс}} = E_{\text{пр.макс}} h \cdot \frac{1}{k} \quad (4.9)$$

де h – відстань між електродами; k – коефіцієнт неоднорідності поля, значення якого для випадку при одній ізольованій та одній заземленій кулі наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Визначення коефіцієнта неоднорідності поля

h/R	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
k	1.03	1.07	1.14	1.23	1.32	1.41

4.5. Зміст звіту

4.5.1. Мета та програма роботи.

4.5.2. Схема дослідної установки.

4.5.3. Таблиця з вимірними та розрахованими даними.

4.5.4. Графіки залежностей $U_{np} = f(h)$; $E_{np} = f(h)$ для двох видів електродів та для кульових електродів побудувати розрахункові залежності $U_{np} = f(h)$; $E_{np} = f(h)$ і порівняти їх з отриманими експериментально.

4.5.5. Висновки за результатами виконаної роботи.

4.5.6. Список використаної літератури.

4.6. Контрольні питання

4.6.1. Умова самостійності розряду в повітряному проміжку.

4.6.2. Особливість пробою повітряного проміжку в неоднорідному полі.

4.6.3. В яких одиницях вимірюється електрична міцність діелектрика?

4.6.4. Від яких факторів залежить електрична міцність повітря?

4.6.5. Як впливає хімічний склад газів на їх електричну міцність?

4.6.6. Як електрична міцність газів залежить від тиску при постійній температурі?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 5

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

5.1. Мета роботи

Вивчити електричні властивості трансформаторного масла, ознайомитися з вимогами до електричної міцності трансформаторного масла залежно від його призначення, вивчити правила добору проб і визначення електричної міцності трансформаторного масла.

5.2. Основні теоретичні відомості

Рідкі діелектрики відрізняються більш високою електричною міцністю, ніж газоподібні. Наявність домішок в рідких діелектриках призводить до зниження їх електричної міцності і викликає труднощі для створення точної теорії пробою цих речовин. Чисті рідкі діелектрики отримати важко; постійними домішками є вода, гази, тверді частинки. Пробій рідин, що мають газові домішки, пояснюється місцевим перегріванням рідини. Вплив води, що не змішується з трансформаторним маслом при нормальній температурі, коли вода тримається в маслі у вигляді окремих крапель, показано на рис. 5.1. Під впливом електричного поля краплі води (сильно полярної рідини) поляризуються і створюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких відбувається електричний пробій.

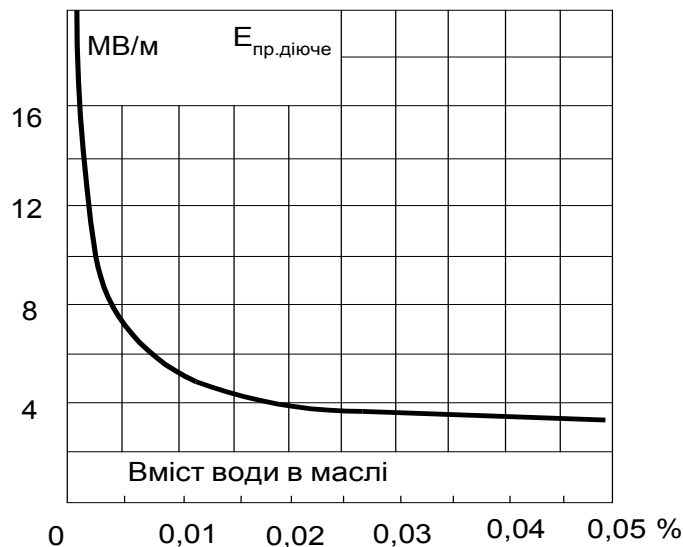


Рис. 5.1 Залежність електричної міцності від наявності води в трансформаторному маслі

Електрична міцність чистого масла мало залежить від температури до +80 °С. При +80 °С починається кипіння легких масляних фракцій і з'являється велика кількість кульок пару в рідині, що приводить до зниження електричної міцності. Наявність води знижує електричну міцність масла при низькій і нормальній температурі. Збільшення $E_{\text{пр}}$ експлуатаційного масла при підвищенні температури зумовлене переходом води зі стану емульсії в стан молекулярного розчину. Подальше зниження

$E_{пр}$ пояснюється процесами кипіння рідини. Збільшення електричної міцності при низьких $t^{\circ}\text{C}$ пов'язане зі збільшенням в'язкості масла і меншим значенням діелектричної проникності льоду порівняно з водою. Тверді забруднення (сажа, обривки волокон) спотворюють електричне поле всередині рідини і також призводять до зниження електричної міцності.

На рис. 5.2 показаний вплив температури на електричну міцність трансформаторного масла з домішками води.

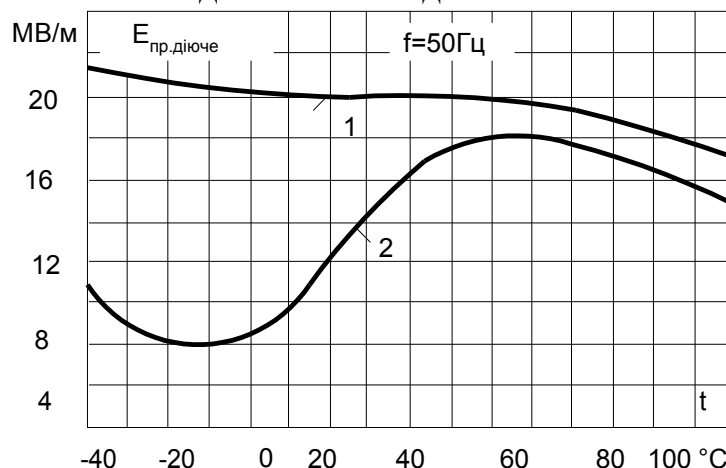


Рис. 5.2 Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури (1 – висушене скло; 2 – експлуатаційне масло)

Очищення рідких діелектриків, зокрема масел, від домішок помітно підвищує електричну міцність. Так, наприклад, неочищене трансформаторне масло має $E_{пр} \approx 4$ МВ/м; після ретельного очищення електрична міцність масла підвищується до 20-25 МВ/м.

Мінеральне трансформаторне масло має високі ізолювальні властивості, завдяки чому його широко застосовують у високовольтних мережах, трансформаторах, кабелях високої напруги, прохідних ізоляторах, масляних вимикачах та ін.

Перед заливанням масла в трансформатори та інші пристрої, а також у процесі експлуатації цих пристроїв потрібно періодично перевіряти електричну міцність масла і вживати заходів для її відновлення.

Пробу масла для визначення електричної міцності беруть з бака трансформатора чи іншого апарата в чисту і суху банку або скляну пляшку, що щільно закривається пробкою та заливається парафіном. Для взяття проби масла з трансформатора необхідно відкрити спускний кран у нижній частині бака трансформатора, дати стекти невеликій кількості масла для промивання крана і потім уже підставити заздалегідь підготовлену ємність. Для того щоб у масло не потрапляла волога з повітря, проба береться, по можливості, у суху погоду. Проба масла, доставлена в лабораторію взимку, повинна постояти закупореною 8-12 год., поки масло не набуде кімнатної температури. Потрапляння, навіть у незначній кількості, домішок в масло спотворює результати випробувань, тому необхідно забезпечити відсутність забруднень і вологи в

випробувальному розряднику, а також систематично перевіряти стан поверхні його електродів. Перед початком дослідів чистий сухий розрядник, у якому робиться визначення електричної міцності масла, промивається 2-3 рази випробуванним маслом. При промиванні масло направляють на електроди таким чином, щоб змити з них залишки масла і сажі від попередніх випробувань. Після промивання посудину заповнюють випробуванним маслом. Лити масло слід обережно, невеликим струменем, направляючи його на стінку розрядника, щоб в маслі утворювалося якнайменше повітряних включень. Після заливання масла дають 10-15 хвилин відстоятися.

Випробування трансформаторного масла на електричну міцність проводиться на апараті АИМ-80 (рис. 5.3), виконаному у вигляді пульта переносного типу, що містить у собі такі основні елементи: бак з високовольтним трансформатором, регулятор напруги (варіатор) з електродвигунним приводом, розрядник для випробувань, вимірювальний прилад, сигнальні лампи, магнітний пускач, реле максимального струму.

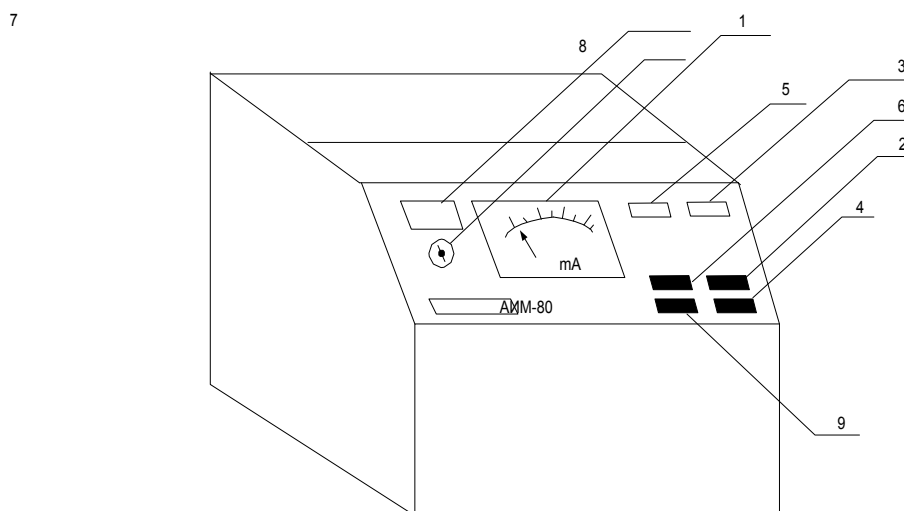


Рис. 5.3 Зовнішній вигляд установки АИМ-80

1 – кіловольтметр; 2 – кнопка ввімкнення напруги; 3 – червона лампа, що сигналізує ввімкнення напруги; 4 – кнопка-вимикач для зупинки електричного двигуна; 5 – жовта сигнальна лампа – показник готовності схеми апарата до ввімкнення випробувальної напруги; 6 – кнопка ввімкнення електродвигуна після пробою; 7 – зелена сигнальна лампа, що показує, чи увімкнена установка; 8 – вмикач мережі; 9 – кнопка-вимикач автоматичного повернення регулятора напруги в нульове положення після пробою випробуваного діелектрика.

Принципова електрична схема апарата АИМ-80 зображена на рис. 5.4.

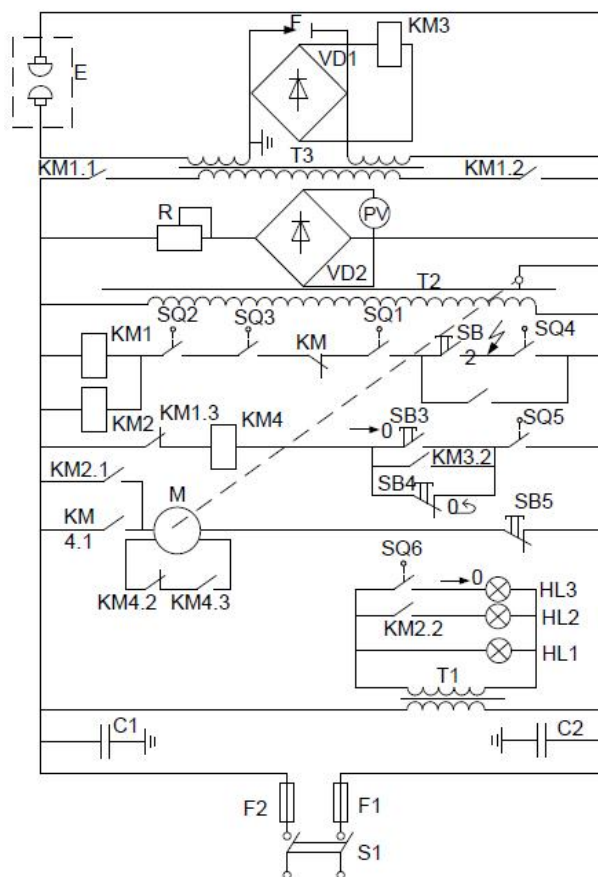


Рис. 5.4 Принципова електрична схема апарата АИМ-80

Напруга 220 В через вимикач мережі за допомогою спеціального ключа $S1(\sim)$ через запобіжники $F1, F2$ подається на схему. Після вмикання напругу отримують трансформатор живлення $T1$ сигнальних ламп і автотрансформатор-варіатор напруги $T2$, що має рухливу контактну щітку. Про подачу напруги сигналізує зелена лампа $HL1$.

Випробувальний (головний) трансформатор $T3$ одержує живлення від варіатора $T2$ через силові контакти $KM1.1, KM1.2$ головного контактора $KM1$, котушка якого отримує живлення разом з котушкою проміжного реле $KM2$ при замиканні кнопки $SB2$ за таких умов: рухлива щітка варіатора знаходиться в нульовому положенні (замкнуте блокування $SQ1$), закриті дверцята банки з електродами E (замкнуті блокування $SQ2, SQ3$). Через блок-контакти $KM2.1$ при включеній кнопці $SB3$ одержує живлення електродвигун M , що переміщає варіатор. При цьому рівномірно підвищується напруга на вторинній обмотці трансформатора $T3$ і електродах E . Про наявність напруги на досліджуваному трансформаторі сигналізує червона лампа $HL2$.

У момент електричного пробую діелектрика спрацьовує контактор $KM3$, блокуванням контактами $KM3.1$ переривається ланцюг живлення котушок контактора $KM1$ і реле $KM2$, розмикаються силові контакти $KM1.1; KM1.2$, відключається випробувальний трансформатор $T3$, втрачає живлення двигун M . Напруга пробую визначається за приладом, що на

якийсь час фіксує показання.

Для повернення варіатора і стрілки вимірювального приладу в нульове положення (у випадку розімкнутих контактів кнопки *SB4*) необхідно натиснути кнопку *SB5*, після чого здійсниться реверс електродвигуна.

При поверненні варіатора в нульове положення замикається блокування *SQ4* варіатора в колі котушок *KM1*; *KM2*, чим підготовляється схема до повторної роботи. Розмикається блокування *SQ5* у колі котушки *KM4*, контактами *KM4.1* відключається електродвигун, замикається блокування *SQ6* у колі жовтої сигнальної лампи *HL3*, що вказує на готовність схеми апарата до наступного випробування.

Якщо кнопку *SB4* поставити в положення замкнутих його контактів, після пробою діелектрика повернення варіатора і стрілки вимірювального приладу в нульове положення буде відбуватися автоматично. Блокуванням варіатора *SQ1* відключають трансформатор при підйомі напруги вище номінального значення напруги мережі, яке рівне 220 В.

За допомогою кнопки *SB3* можна в будь-який момент припинити підвищення напруги і потримати якийсь час випробувальне масло під незмінною напругою.

Перед включенням установки варто перевірити справність захисного заземлення корпусу установки, справність блокувальних контактів, розташованих на кришці.

Для запобігання появи високої напруги на низьковольтних колах в схемі передбачені конденсатори захисту *C1*, *C2*.

У процесі досліду **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ**:

- переривати підвищення випробної напруги в інтервалі 60...80 кВ вимиканням електродвигуна на час, більший ніж 20 с, тому що первинна обмотка трансформатора не розрахована на тривале протікання по ній струму холостого ходу трансформатора при зазначених значеннях напруги;

- включати високу напругу при невстановленій ємності в досліджуваному апараті;

- працювати на апараті при напрузі вище 80 кВ. При досягненні зазначеного значення необхідно відключити апарат мережним вимикачем;

- відкривати кришку установки при ввімкненій напрузі.

5.3. Послідовність виконання роботи



5.3.1. Переконалися, що напруга з установки знята. Виконати правила техніки безпеки.


5.3.2. Відкрити верхні дверцята апарата, встановити досліджуваний розрядник з трансформаторним маслом в апарат, закрити дверцята.

5.3.3. Кнопка *SB₄* (↗) може перебувати в одному з двох положень (див. опис схеми).

5.3.4. Подати напругу на схему, ввімкнути вимикач *S1* (~). При цьому повинна загорітися зелена лампа.

Після ввімкнення необхідно, щоб стрілочка вимірювального приладу встановилася на нулі, і горів жовтий сигнал. При цьому можливо, що стрілочка вимірювального приладу:

- а) стоїть на нулі і горить жовтий сигнал;
- б) рухається до нуля, якщо кнопка SB4 () включена;
- в) стоїть не на нулі, якщо SB4 () відключена. У цьому випадку необхідно натиснути кнопку SB5 ($\rightarrow 0$).

5.3.5. Натиснути кнопку включення випробної напруги SB2 (). При цьому повинен з'явитися червоний сигнал, згаснути жовтий; напруга на

електродах автоматично підвищується до пробою. Покази кіловольтметра показують значення пробивної напруги діелектрика.

5.3.6. Після повернення варіатора в нульове положення і загоряння жовтої лампи необхідно відключити мережний вимикач; відкрити дверцята і випробування кожної проби масла зробити шість разів з п'ятихвилинними інтервалами між пробоями. Інтервали необхідні для того, щоб тверді і газоподібні продукти розкладу масла видалилися з простору між електродами. Перший із шести пробів у розрахунок не приймається, тому що на електродах можуть бути порошини, що впливають на значення напруги пробою.

За напругу пробою проби масла приймається середнє арифметичне з п'яти наступних значень. Результати випробувань заносяться в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати випробувань						
Номер досліду	1	2	3	4	5	6
Напруга пробою, кВ						

5.3.7. Визначити середнє значення напруги пробою: $U_{\text{серпр}}$.кВ.

5.3.8. На підставі результатів дослідів і даних табл. 5.2 зробити висновок про можливість використання масла.

	Показник якості масла в установці												Експлуатаційного всіх марок
	Свіжого сухого перед заливанням						Після заливання						
	ГОСТ 982-68(ТКп)	ГОСТ 10121-76		ТУ 38-101-281-75 (адсорбованого очищення)	ГОСТ 5.1710-72 (Т-750)	ТУ 38-101-226-74 (Т-1500)	ГОСТ 982-68(ТКп)	ГОСТ 10121-76		ТУ 38-101-281-75 (адсорбованого очищення)	ГОСТ 5.1710-72 (Т-750)	ТУ 38-101-226-74 (Т-1500)	
		1-ї категорії якості	3 державним знаком					1-ї категорії якості	3				
1. Найменша напруга пробою, кВ, визначена в стандартному маслопробивному апараті для трансформаторів, апаратів і вводів на напругу:													
до 15 кВ	30	30	30	30	-	-	25	25	25	25	-	-	20
більше 15...35 кВ	35	35	35	35	-	-	30	30	30	30	-	-	25
60...220 кВ	45	45	45	45	-	-	40	40	40	40	-	-	35
330...500 кВ	55	-	55	55	55	55	50	-	50	50	50	50	45
750 кВ	-	-	-	-	65	65	-	-	-	-	60	60	55
2. Вміст механічних домішок	Відсутність (вичвлення візуальне)												
3. Кислотне число, мг КОН на 1г масло, не більше	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,25
4. Температура	135	150	150	135	135	135	150	150	150	135	135	135	Зниження не більше 5% порівняно з попереднім аналізом
5. Тангенс кута діелектричних втрат, %, не більше при													
20 ⁰ С	0,2	0,2	-	-	-	-	0,3	0,3	-	-	-	-	-
70 ⁰ С	1,5	2,0	-	-	0,3	-	-	-	0,7	1,5	0,7	0,7	7
90 ⁰ С	2,6	2,6	0,5	1	0,5	0,5	-	-	0,7	1,5	0,7	0,7	-

5.4. Контрольні питання

5.4.1. Фізична сутність електричного пробою чистих рідких діелектриків.

5.4.2. Поясніть залежність електричної міцності трансформаторного масла від вмісту води.

5.4.3. Правила добору проб масла і проведення його дослідження.

5.4.4. Способи регенерації трансформаторного масла.

5.4.5. Вкажіть заходи для уповільнення процесу старіння трансформаторного масла.

5.4.6. Поясніть технологію виготовлення трансформаторного масла.

САМОСТІЙНА РОБОТА № 6

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

6.1. Мета роботи

Вивчити процеси в твердих діелектриках при різних видах пробою, ознайомитися з порядком проведення випробувань твердих діелектриків і визначення їхньої електричної міцності, а також отримати уявлення про значення напруг пробою найбільш поширених твердих ізоляційних матеріалів.

6.2. Основні теоретичні відомості

У сучасній електротехніці використовується велика кількість найрізноманітніших видів твердих діелектриків. Серед них є матеріали як природного походження (слюда, мармур, азбест, каніфоль), так і штучні (текстоліт, гетинакс, лакотканини, фарфор, синтетичні смоли, пластмаси). Але, незважаючи на таку різноманітність, усі тверді діелектрики підкоряються загальним законам, які визначають їхню електричну міцність.

Найхарактернішою особливістю твердих діелектриків, яка відрізняє їх від рідких та газоподібних діелектриків, є втрата ними після пробою електроізолювальних властивостей. Порушення електричної міцності твердих діелектриків може бути наслідком пробою як крізь об'єм, так і по поверхні. Пробій по поверхні звичайно називають поверхневим розрядом, або перекриттям діелектрика. Якщо пробій крізь об'єм, в основному, визначається будовою діелектрика, то розряд по його поверхні залежить не лише від властивостей самого матеріалу, а й від стану його поверхні і навколишнього середовища.

Електрична міцність діелектрика залежить від хімічної будови його матеріалу.

Крім хімічної будови на величину $E_{\text{пр}}$ твердих діелектриків впливає й фізична структура. Матеріали неоднорідної будови мають занижену величину $E_{\text{пр}}$, але, якщо вони просочені електроізоляційними матеріалами, то підвищується їх електрична міцність.

Для забезпечення надійності роботи діелектриків їх робоча напруга U_p повинна бути значно нижчою від пробивного значення.

Відношення $U_{\text{пр}}$ до U_p називається коефіцієнтом запасу електричної міцності і для кожного виду діелектрика встановлюється залежно від його фізико-хімічних властивостей та умов роботи. Існує два основних види пробою діелектриків: електричний та тепловий.

Особливий практичний інтерес викликає явище пробою твердих полярних і неполярних діелектриків в однорідному й неоднорідному полях. Так, електрична міцність неполярного діелектрика в однорідному електричному полі значно вища від його електричної міцності в неоднорідному полі. Зовсім інший результат отримують при випробуванні

полярного діелектрика у тих самих полях. Здебільшого при випробуваннях електрична міцність у неоднорідному електричному полі може бути вища, ніж в однорідному. Це явище можна пояснити тим, що у неоднорідному полі електрод “голку” можна встановити на ділянку з ознаками неполярного діелектрика. А на електродах “площина – площина” у поле потрапляє більше ділянок, у тому числі ділянки з ознаками полярного діелектрика. На останніх і відбувається пробій при нижчих значеннях U .

Розрізняють чотири види пробою твердих діелектриків:

- електричний пробій макроскопічних однорідних діелектриків;
- електричний пробій неоднорідних діелектриків;
- тепловий (електротепловий) пробій;
- електрохімічний пробій.

Кожний із зазначених видів пробою може мати місце для того самого матеріалу залежно від характеру електричного поля (постійного чи змінного, імпульсного, низької чи високої частоти), наявності в діелектрику дефектів, зокрема закритих пор, від умов охолодження, часу впливу напруги.

Електричний пробій макроскопічних однорідних діелектриків. Характеризується дуже швидким розвитком, він протікає за час $10^{-7} - 10^{-8}$ с, і не зумовлений тепловою енергією, хоча електрична міцність при електричному пробі до деякої міри залежить від температури.

Електричний пробій, за своєю природою, є чисто електронним процесом, коли з деяких початкових електронів у твердому тілі створюється електронна лавина. Електрони розсіюють енергію свого руху, накопичену в електричному полі, збуджуючи пружні коливання кристалічних ґраток. Електрони, що досягли певної критичної швидкості, сприяють відщепленню нових електронів, і стаціонарний стан порушується, тобто виникає ударна іонізація електронами у твердому тілі.

Чисто електричний пробій має місце, коли унеможливлений вплив електропровідності та діелектричних втрат, що зумовлюють нагрівання матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. Для однорідного поля і повної однорідності структури матеріалу напруженість поля при електричному пробі може служити мірою електричної міцності речовини.

Такі умови можна спостерігати для монокристалів лужно-галоїдних сполук і деяких органічних полімерів. У цьому випадку $E_{пр}$ досягає сотень мегавольт на метр і більше.

Для однорідних матеріалів характерна помітна різниця між значеннями напруги пробою в однорідному і неоднорідному полях.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків. Він характерний для технічних діелектриків, що містять газові домішки, і так само, як і електричний пробій однорідного діелектрика, дуже швидко розвивається.

Прийнято вважати, що в однорідному полі електрична міцність скла, порцеляни й інших твердих діелектриків не залежить від товщини зразка. Однак основні роботи з вивчення впливу ступеня однорідності на

електричну міцність проводилися лише зі склом при дуже малих товщинах зразків – від 0,05 до 0,2–0,5 мм, коли число дефектів невелике. Зі збільшенням товщини зразка підсилюється неоднорідність структури, зростає число газових включень і знижується електрична міцність як в однорідному, так і в неоднорідному полях. Іноді на досліді можна спостерігати, що електрична міцність кераміки при електродах, що створюють зовнішнє неоднорідне поле, буде навіть вища, ніж при електродах, що забезпечують однорідне поле. Електрична міцність твердих діелектриків практично не залежить від температури до деякого її значення. Вище цього значення спостерігається помітне зниження електричної міцності, що вказує на появу механізму теплового пробою.

Електротепловий (скорочено тепловий) пробій. Він зводиться до розігріву матеріалу в електричному полі до температур, що відповідають хоча б місцевій втраті ним електроізоляційних властивостей, пов'язаній з надмірним зростанням наскрізної електропровідності або діелектричних втрат. Напруга пробою при тепловому пробіі залежить від низки чинників: частоти поля, умов охолодження, температури навколишнього середовища та інших. Крім того, напруга теплового пробою пов'язана з нагрівостійкістю матеріалу. Органічні діелектрики внаслідок малої нагрівостійкості за інших рівних умов мають більш низькі значення пробивних напруг при тепловому пробіі, ніж неорганічні. При розрахунках напруги теплового пробою повинні братися до уваги значення $\tan\delta$ діелектрика і його залежність від температури, а також діелектрична проникність матеріалу. У ланцюгах змінного струму низької частоти знаходять застосування матеріали, що дають різке зростання $\tan\delta$ уже при нагріванні вище 20–30°C; з іншого боку, відомі діелектрики, значення $\tan\delta$ яких мало міняється в дуже широкому інтервалі температур, аж до 150–200°C; в останньому випадку тепловий пробій зможе розвиватися тільки при досягненні цих температур. Температура нагрівання ізолятора в електричному полі високої напруги встановлюється тоді, коли тепловиділення виявиться рівним тепловіддачі в навколишнє середовище. У більшості випадків тепловідведення зумовлюється конвекцією повітря. Такі умови роботи підвісних і опорних ізоляторів, керамічних конденсаторів, каркасів котушок індуктивності. Тепловідведення за рахунок теплопровідності навколишнього середовища має місце для кабелів, вводів, вмонтованих у стіни. Звичайно при розрахунку ізоляторів вибирають таку робочу напругу, що відповідає сталій температурі, щоб температура нагрівання не перевищувала деякого заданого значення, небезпечного з точки зору нагрівостійкості діелектрика.

Електрохімічний пробій. Для ізоляційних матеріалів він має особливо істотне значення при підвищених температурах і високій вологості повітря. Цей вид пробою простежується при постійній і змінній напругах низької частоти, коли в матеріалі розвиваються електролітичні процеси, що зумовлюють незворотне зменшення опору ізоляції.

Таке явище часто називають також старінням діелектрика в

електричному полі, оскільки воно приводить до поступового зниження електричної міцності.

Електрохімічний пробій вимагає для свого розвитку тривалого часу, тому що він пов'язаний з повільним виділенням в матеріалі малих кількостей хімічно активних речовин або з утворенням напівпровідних з'єднань. У кераміці, що містить окисли металів змінної валентності (наприклад, TiO_2), електрохімічний пробій зустрічається значно частіше, ніж у кераміці, що складається з окислів алюмінію, кремнію, магнію, барію.

Тепловий пробій виникає у тому випадку, коли кількість теплоти, що виділяється в діелектрику за рахунок діелектричних втрат, перевищує кількість теплоти, яка може виділитися в навколишнє середовище. При цьому порушується теплова рівновага, а процес набуває лавиноподібного характеру. Явище теплового пробою зводиться до розігрівання матеріалу в електричному полі до недопустимих температур. Електрична міцність при тепловому пробіє є характеристикою не тільки матеріалу, але й виробу з нього, тоді як електрична міцність при електричному пробіє служить характеристикою самого матеріалу. Напруга пробою, зумовлена нагрівом діелектрика, пов'язана з частотою напруги, умовами охолодження, температурою навколишнього середовища. Крім цього, електротеплова напруга пробою залежить від нагрівостійкості матеріалу. Органічні діелектрики (наприклад, полістирол) мають нижчі значення електротеплових напруг пробою, ніж неорганічні (кварц, кераміка).

Розглянемо методику спрощеного розрахунку напруги пробою при тепловому пробіє. Нехай пластинка однорідного діелектрика, що має втрати, знаходиться між двома електродами, як показано на рис. 6.1.

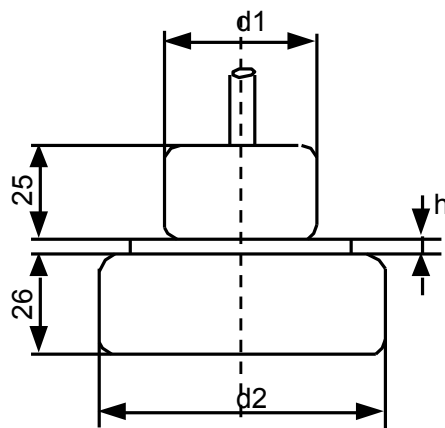


Рис. 6.1 Форма електродів для визначення електричної міцності твердих діелектриків

До електродів від достатнього потужного джерела змінного струму прикладається напруга, яку можна збільшувати до пробивної. Механізм теплового пробою найбільш вірогідний при підвищених температурах, коли переважаючими будуть втрати наскрізної електропровідності.

Температура t по всьому об'єму матеріалу, що знаходиться в

електричному полі між електродами, буде однакою за умови, що товщина діелектрика невелика і теплопровідність його не дуже погана. Оскільки теплопровідність металу електродів за рідкісним винятком на два-три порядки більша, ніж теплопровідність діелектрика, вважається, що теплота з його об'єму передається в навколишнє середовище через електроди. Потужність, яка відводиться від діелектрика, виразимо за допомогою формули Ньютона:

$$P_T = 2 \cdot \sigma \cdot S \cdot (t - t_0), \quad (6.1)$$

де σ – коефіцієнт теплопередачі системи діелектрик-метал електродів; S – площа електрода; t – температура нагрітого за рахунок діелектричних втрат матеріалу; t_0 – температура електродів приблизно дорівнює температурі навколишнього середовища.

Активна потужність P_a , яка виділяється в діелектриках за рахунок діелектричних втрат, залежить від температури, а форма її кривої зумовлюється температурною залежністю $\operatorname{tg} \delta$ і визначається формулою:

$$P_a = \frac{U^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)}}{1.8 \cdot 10^{10} \cdot h}, \quad (6.2)$$

де U – прикладена напруга; f – частота; ε_r – відносна діелектрична проникність; $\operatorname{tg} \delta_0$ – тангенс кута діелектричних втрат діелектрика при температурі навколишнього середовища; α – температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат; h – товщина діелектрика.

Для наочності подальших міркувань скористаємося графічною побудовою, показаною на рис. 6.2, де у вибраній системі координат зображені експоненти тепловиділення $P_a = F(t)$ при різних значеннях прикладеної напруги і пряма тепловіддачі $P_T = \varphi(t)$.

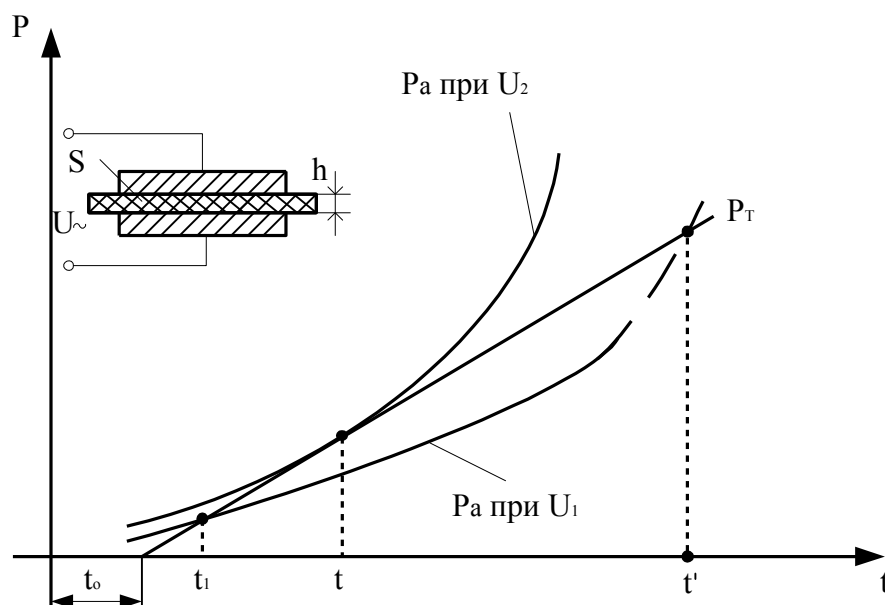


Рис. 6.2 Пояснення до розрахунку пробивної напруги при тепловому пробіі

При значенні прикладеної напруги U_1 пряма теплопередачі P_T є січною прямою тепловиділення. При температурі t_1 настає стан стійкої

теплової рівноваги, оскільки потужність тепловиділення рівна потужності, що відводиться від зразка. Якщо температура не перевищує значення t' , то потужність, що відводиться, буде більшою потужності тепловиділення, і зразок поступово буде повертатися в стійкий стан при температурі t_1 . Напруга U_1 буде безпечною для зразка діелектрика в даних умовах, якщо нагрів до температури t' не призведе до механічного або хімічного руйнування структури матеріалу. При збільшенні напруги до значення U_2 , при якому пряма теплопередачі є дотичною до кривої тепловиділення, буде нестійка тепла рівновага при температурі t . Таким чином, напруга, при якій має місце нестійкий граничний режим, може бути прийнята за напругу теплового пробою $U_{пр}$. Її можна визначити за двох умов:

$$P_a = P_t; \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial t} = \frac{\partial P_t}{\partial t}. \quad (6.4)$$

Умова може бути записана тільки для одного граничного режиму. Дана умова справедлива для всіх випадків стійкої роботи діелектрика під напругою. Використовуючи попередні формули, одержуємо:

$$\frac{U^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)}}{1.8 \cdot 10^{10} \cdot h} = 2 \cdot \sigma \cdot S \cdot (t - t_0); \quad (6.5)$$

$$\frac{\alpha \cdot U^2 \cdot f \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)}}{1.8 \cdot 10^{10} \cdot h} = 2 \cdot \sigma \cdot S. \quad (6.6)$$

Розділивши вираз (6.5) на (6.6), одержуємо:

$$\frac{1}{\alpha} = t - t_0 \quad (6.7)$$

Підставляючи (6.7) в (6.6) і, розв'язуючи одержане рівняння відносно U , визначаємо величину $U_{пр}$:

$$U_{пр} = K \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot h}{f \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot \alpha}}, \quad (6.8)$$

де K – числовий коефіцієнт, рівний $115 \div 105$, якщо всі величини, що мають розмірності, виражені в одиницях системи СІ.

Одержаний вираз показує, що напруга теплового пробою буде вищою, якщо умови тепловіддачі кращі і діелектрик товстіший, і меншою – при високих частотах, великому коефіцієнті діелектричних втрат ε , $\operatorname{tg} \delta_0$ і великому температурному коефіцієнті тангенса кута діелектричних втрат α .

У загальному випадку тепловий пробій – складніше явище, ніж було розглянуто. По товщині діелектрика має місце перепад температури, середній шар виявляється нагрітим вище, ніж прилеглі до електродів, опір першого різко падає, що веде до спотворення електричного поля і підвищених градієнтів напруги в поверхневих шарах. Впливає також і

теплопровідність матеріалу електродів. Все це сприяє пробою зразків при нижчих напругах, ніж одержані з наближеного розрахунку.

Залежність електричної міцності від великого числа різних факторів змушує визначати електричну міцність при строго нормованих умовах випробувань (від напруги, швидкості її підйому, площі, форми електродів і відстані між електродами, числа зразків, температури та вологості навколишнього середовища). Оскільки реальні умови роботи матеріалів здебільшого відрізняються від умов, у яких проводяться випробування, отримані результати можуть бути використані при розрахунках електроізоляційних конструкцій лише після введення відповідних поправкових коефіцієнтів.

Два електроди можуть знаходитися на поверхні діелектрика. У цьому випадку при перекритті відбувається порушення електричної міцності повітря, а характеристики діелектрика (діелектрична проникність, поверхневий і об'ємний опори, товщина діелектрика) впливають на значення напруженості перекриття, що, як правило, значно нижча напруженості пробою по товщині.

6.3. Порядок виконання роботи

6.3.1. Ознайомитися зі зразками твердих діелектриків, які будуть випробуватись.

6.3.2. Виміряти мікрометром товщину кожного зразка не менше, ніж у трьох місцях, і обчислити середнє значення товщини випробувального зразка.

6.3.3. Установити зразок діелектрика у випробувальну установку (рис. 6.3). Перемикач $S2$ повинен знаходитися в положенні “5А”, а вимикач $S1$ розімкнутий. Вимірювання досліджуваної напруги проводиться вольтметром PV , повне відхилення стрілки якого відповідає 100 кВ. У випадку перекриття випробуваного об'єкта спрацьовує реле KA , розмикається його контакт $KA1$, відпадає магнітний пускач KM , відключаючи своїми контактами $KM1$, $KM2$ установку від джерела живлення. Для повторного ввімкнення установки необхідно регулятор автотрансформатора $T3$ установити в нульове положення, а потім повторити перелічені операції.

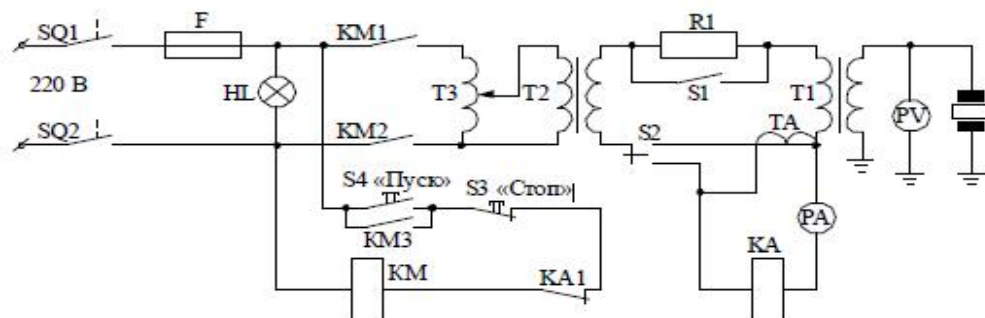


Рис. 6.3. Електрична схема випробувальної установки

6.4.4. Результати вимірів і розрахунків записати в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1

Результати вимірів і розрахунків

Найменування діелектрика	Середня товщина, мм	$U_{\text{пр}},$ кВ	$U_{\text{ср}},$ кВ	$U_{\text{макс}} = \sqrt{2U_{\text{ср}}},$ кВ	$E_{\text{пр}},$ кВ/мм	$E_{\text{ср}},$ кВ/мм
1						
2						

6.4.5. Розрядним пристроєм зняти заряд з електродів.

6.4.6. Провести випробування інших твердих діелектриків, вказаних викладачем.

Особливі умови виконання техніки безпеки:

- а) під час випробувань забороняється заходити за огороження;
- б) при регулюванні відстані між електродами слід зняти напругу з установки і відімкнути схему від мережі;
- в) забороняється вимикати схему, не знявши попередньо напругу з випробувального стенда;
- г) після кожного вимірювання треба розрядити випробувальний стенд.

6.5. Обробка результатів вимірювань

6.5.1. Розрахувати за даними досліджень електричну міцність твердих діелектриків, беручи $U_{\text{пр}}$ за результатами випробувань.

6.5.2. Результати розрахунків занести до табл. 6.1.

6.5.3. За результатами дослідів дати порівняльні оцінки електричної міцності твердих діелектриків.

6.6. Зміст звіту

6.6.1. Мета та програма роботи.

6.6.2. Схема дослідної установки.

6.6.3. Таблиця з виміряними та розрахованими даними.

6.6.4. Висновки за результатами виконаної роботи.

6.6.5. Список використаної літератури.

6.7. Контрольні питання

6.7.1. Види пробою твердих діелектриків.

6.7.2. Основні фактори, що впливають на процес пробою твердих ізоляційних матеріалів.

6.7.3. Чому збільшується електрична міцність конденсаторного паперу після просочення його трансформаторним маслом?

6.7.4. Які вимоги висуваються до зразків випробуваних діелектриків?

- 6.7.5.** Коли в електроізоляційних матеріалах настає тепловий пробій?
- 6.7.6.** Коли в електроізоляційних матеріалах настає іонізаційний пробій?
- 6.7.7.** Коли в електроізоляційних матеріалах настає електрохімічний пробій?
- 6.7.8.** Як електрична міцність залежить від температури?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 7
**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ
ПИТОМОГО ОПОРУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

7.1. Мета роботи

Провести комп'ютерне моделювання та дослідити вплив зміни температури на питомі опори власного та домішкового напівпровідників. Ознайомитись з методикою визначення власної та домішкової концентрацій зарядів в напівпровідниках.

7.2. Основні теоретичні відомості

Електропровідність напівпровідників залежить від напруженості електричного поля. При низьких значеннях напруженості (до деякого критичного значення E_K) виконується закон Ома і питома провідність не залежить від напруженості поля, а при більш високих напруженостях поля починається інтенсивне зростання питомої провідності за експонентним законом, що приводить до руйнування структури напівпровідника. З ростом температури питома провідність збільшується. Для ряду напівпровідників залежність питомої провідності від напруженості поля описується виразом:

$$\gamma_E = \gamma \cdot e^{\beta \sqrt{E}} \quad (7.1)$$

де γ – питома провідність напівпровідника при $E < E_K$; β – коефіцієнт, що характеризує напівпровідник.

Зростання провідності зумовлено ростом числа носіїв заряду. При подальшому зростанні поля може з'явитися механізм ударної іонізації, що приводить до руйнування структури напівпровідника.

Найбільш важливі технічні застосування напівпровідників засновані на створенні в одному матеріалі контактувальних областей з різними типами електропровідності – (р-п-переходів), з однією електропровідністю, але різної величини (п-п+ або р-р+), а також контактів метал-напівпровідник, метал-діелектрик-напівпровідник та ін. Для найбільш широко використовуваних напівпровідників ширина забороненої зони складає 0,5–2,5 еВ. На рисунку 7.1, а наведена енергетична діаграма власного напівпровідника, тобто такого, у якого електрони в зону вільних енергетичних рівнів можуть переходити лише з заповненої електронами зони. Розподіл електронів по рівнях енергії, зображений на рис. 7.1, а, відповідає деякій температурі T , при якій у зону провідності перейшло декілька електронів, утворивши у валентній зоні відповідне число дірок.

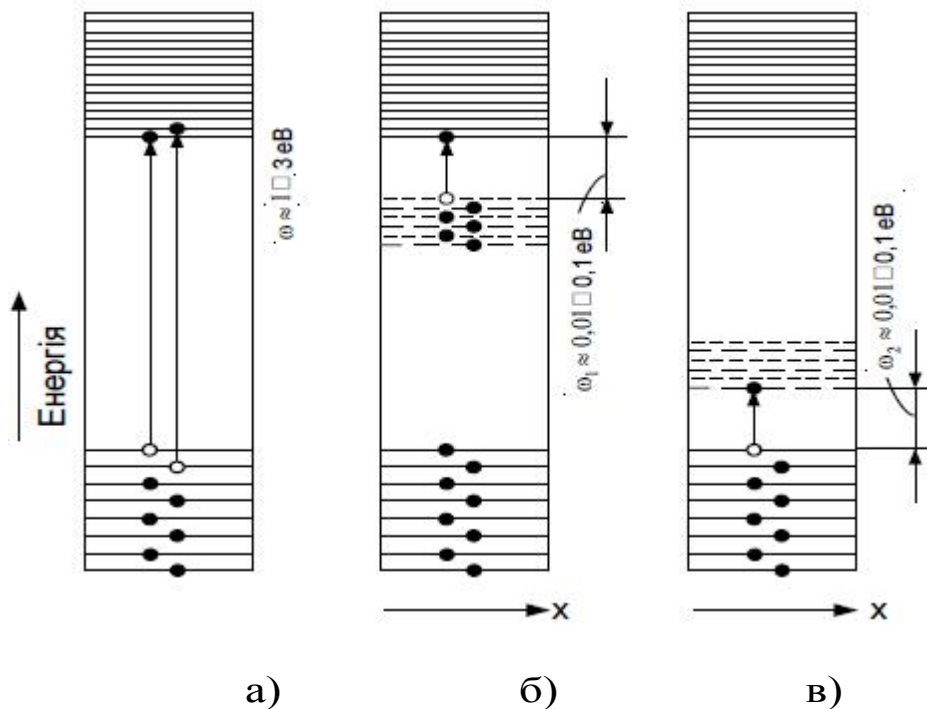


Рис. 7.1 Вплив домішок на енергетичну діаграму напівпровідників

а – власний напівпровідник, б – напівпровідник з донорною домішкою та електронною електропровідністю (n-типу), в – напівпровідник з акцепторною домішкою та дірковою електропровідністю (p-типу)

Оскільки при кожному порушенні у власному напівпровіднику одночасно створюються два заряди протилежних знаків, то загальна кількість носіїв заряду буде в два рази більша числа електронів у зоні провідності, тобто:

$$n_{0i} = p_{0i} + n_{0i} + p_{0i} = 2n_{0i} \quad (7.2)$$

де індекс i в концентрації електронів і дірок означає, що це власні носії зарядів.

У розглянутому випадку питома провідність:

$$\gamma = e \cdot n_{0i} \cdot u_n + e \cdot p_{0i} \quad (7.3)$$

де u_n , u_p – рухливість, відповідно, електронів і дірок.

У результаті процесів порушення і рекомбінації при будь-якій температурі тіла встановлюється рівноважна концентрація збуджених носіїв: електронів:

$$n_{0i} = 2N_c \exp\left(-\frac{\Delta w}{2kT}\right) \quad (7.4)$$

дірок:

$$p_{0i} = 2N_v \exp\left(-\frac{\Delta w}{2kT}\right) \quad (7.5)$$

де Δw – ширина забороненої зони напівпровідника; N_c – число енергетичних рівнів в одиниці об'єму напівпровідника у вільній зоні; N_v – те ж у

валентній зоні.

Коефіцієнт 2 показує, що на кожному рівні можуть знаходитися два електрони рухливості електронів u_n і дірок u_p неоднакові. Електрони і дірки мають різну інертність при русі в кристалічних ґратках напівпровідника, тобто відрізняються один від одного ефективними масами m_n^* і m_p^* . У більшості випадків $m_n^* < m_p^*$. Звідси власна електропровідність напівпровідників має переважно слабо виражений електронний характер.

Для більшості напівпровідникових приладів використовуються домішкові напівпровідники. Тому в практиці важливе значення мають такі напівпровідникові матеріали, у яких відчутна концентрація власних носіїв заряду з'являється при високій температурі, тобто напівпровідники з досить широкою забороненою зоною. У робочому інтервалі температур постачальниками вільних носіїв заряду є домішки. Домішками в простих напівпровідниках служать іншорідні атоми. Під домішками в напівпровідникових хімічних сполуках розуміють не тільки включення атомів іншорідних елементів, але й надлишкові за стехіометричним складом атоми тих самих елементів, що входять у хімічну формулу самої сполуки. Крім того, роль домішок відіграють різні дефекти кристалічних ґраток: порожні вузли, атоми або іони в міжвузлах ґратки, дислокації або зрушення, що виникають при пластичній деформації кристалів, мікротріщини та інше. Якщо домішкові атоми знаходяться у вузлах кристалічних ґраток, то вони називаються домішками заміщеними, якщо між вузлами – домішками впровадження.

Донори й акцептори – це домішки, атоми яких створюють дискретні енергетичні рівні в межах забороненої зони напівпровідника. При невеликій концентрації домішок їхні атоми розташовані в ґратках напівпровідника на таких великих відстанях один від одного, що вони не взаємодіють, а тому енергетичні рівні їх майже такі ж, як в окремому вільному атомі. Імовірність безпосереднього переходу електронів з одного домішкового атома до іншого мізерно мала. Однак домішки можуть або поставляти електрони в зону провідності напівпровідника, або приймати їх з рівнів його валентної зони.

Донори. Заповнені при відсутності зовнішніх енергетичних впливів (тепло, світло) домішкові рівні розташовані в забороненій зоні біля «дна» зони провідності (рис. 7.1, б). При цьому енергія активації домішкових атомів менша, ніж ширина забороненої зони основного напівпровідника, а тому при нагріванні тіла перехід електронів домішок буде випереджати збудження електронів ґратки. Позитивні заряди, що виникли у віддалених один від одного домішкових атомах (на рис. 7.1, б) рівні домішок показані з розривами), залишаються локалізованими, тобто не можуть переміщуватись в кристалі і брати участь в електропровідності. Напівпровідник з такою домішкою має концентрацію електронів більшу, ніж концентрація дірок, що з'явилися за рахунок переходу електронів з валентної зони в зону провідності, і його називають напівпровідником n- типу, а домішки, що поставляють електрони в зону провідності, – донорами.

Акцептори. Інші домішки можуть внести незаповнені рівні, що розташовуються в забороненій зоні основного напівпровідника у верхній частині валентної зони. Теплове порушення буде в першу чергу перекидати електрони з валентної зони на ці вільні домішкові рівні. Через роз'єднаність атомів домішки електрони, які перейшли на домішкові рівні, не будуть брати участь в електричному струмі. Такий напівпровідник буде мати концентрацію дірок більшу, ніж концентрація електронів, що перейшли з валентної зони в зону провідності, і його відносять до р-типу. Домішки, що захоплюють електрони з валентної зони напівпровідника, називаються акцепторами (рис. 7.1, в).

У напівпровідниках з атомними ґратками (а також в іонних кристалах при підвищених температурах) рухливість змінюється при зміні температури порівняно слабо (за усталеним законом), а концентрація – дуже сильно (за експонентним законом). Тому графік температурної залежності питомої провідності подібний температурній залежності концентрації носіїв, обумовлених домішками (рис. 7.2). У зоні виснаження (концентрація постійна) електронних ресурсів домішкових атомів зміна питомої провідності зумовлена температурною залежністю рухливості.

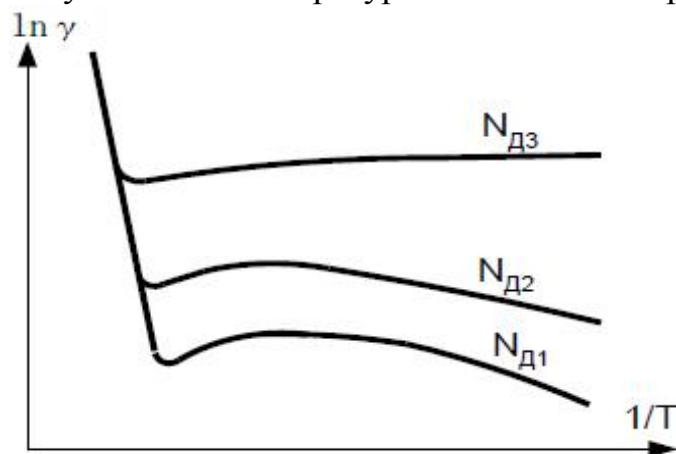


Рис. 7.2 Криві залежності питомої провідності напівпровідників від температури при різних концентраціях домішок ($N_{Д1} < N_{Д2} < N_{Д3}$)

На рис. 7.2 видно зони власної і з домішками електропровідності напівпровідника. У зоні з домішками зображені три криві з домішками для різних значень концентрації домішок, аж до виродження напівпровідника, коли залежність його питомої провідності в деякому інтервалі температур стає подібною до залежності питомої провідності металів.

За допомогою кривих рис. 7.2 можна знаходити як ширину забороненої зони напівпровідника $\Delta\omega$, так і енергію активації домішок ω_b або ω_a . У реальних напівпровідниках ці криві можуть значно відхилитися від зазначених як внаслідок того, що фізичні явища описуються в теорії наближено, так і тому, що в матеріалах, які застосовуються на практиці, не один, а кілька видів домішок, у яких енергії активації можуть бути різними. На підставі рис. 7.2 для похилих лінійних (або квазілінійних)

ділянок кривих в зоні електропровідності з домішками можемо написати:

$$\ln \cdot n = \ln \cdot A - b \frac{1}{T} \text{ або } \ln \cdot \gamma = \ln \cdot A - b \frac{1}{T} \quad (7.6)$$

звідки, наприклад:

$$\gamma = A \exp^{-b/T} \quad (7.7)$$

Теорія електропровідності напівпровідників показує, що для монокристалів типу германія та кремнія постійна визначається так:

$$b = \frac{\omega}{2k} \quad (7.8)$$

де ω – енергія активації; k – постійна Больцмана.

Перетворюючи вираз (7.7) і виразивши його для питомого опору, одержимо:

$$\rho = A \cdot e^{\frac{\omega}{2kT}} \quad (7.9)$$

Використовуючи дані конкретних матеріалів, узяті з кривих, обчислюють енергію активації ω електропровідності з домішками напівпровідника при різній концентрації домішок. В області власної електропровідності за подібним виразом може бути визначена $\Delta\omega$ – ширина забороненої зони даного напівпровідникового матеріалу.

При ширині забороненої зони германія 0,72 еВ число власних носіїв заряду в ньому за кімнатної температури порядку $10^{19} \cdot \text{м}^{-3}$, у той час як домішки, що входять у кількості тисячної частки відсотка, при малій енергії активації (ω) вносять у нього в десятки тисяч разів більше число вільних зарядів. Тому для керування електропровідністю напівпровідник спочатку повинен бути ретельно очищений від випадкових домішок. На 10^8 – 10^9 атомів основної речовини повинно бути не більше одного іншорідного атома.

Температурний коефіцієнт питомого опору напівпровідників:

$$T \cdot k \cdot \rho = \frac{1 \cdot d\rho}{\rho dT} = -\frac{1}{A \cdot e^{b/T}} \quad A \cdot e^{b/T} \cdot b \cdot T^{-2} = -\frac{b}{T^2} \quad (7.10)$$

З підвищенням температури температурний коефіцієнт питомого опору напівпровідників зменшується і перебуває в прямій залежності від енергії активації електропровідності напівпровідника.

Світлова енергія, що поглинається напівпровідником, викликає появу в ньому надлишкової (порівняно з рівноважним за даної температури) кількості носіїв зарядів, що приводить до зростання електропровідності.

Фотопровідністю називають збільшення електричної провідності речовини під дією електромагнітного випромінювання.

У фотопровідності проявляється квантова природа світла. Енергія фотона (у електрон-вольтах):

$$h \cdot \nu = \frac{1.23}{\gamma} \quad (7.11)$$

де λ – довжина хвилі, мкм.

Енергія у власному напівпровіднику витрачається на утворення електронно-діркових пар за рахунок переходу електронів з валентної зони в зону провідності. Тому існує гранична довжина хвилі, обумовлена енергією кванта, достатньою для переходу електрона із найвищого рівня валентної зони на найнижчий рівень зони провідності, тобто рівна ширині забороненої зони напівпровідника. Звідси за довгохвильовим краєм фотопровідності можна визначити ширину забороненої зони напівпровідника (рис. 7.3). Для цього, екстраполювавши круто спадну ділянку кривої до перетинання з віссю абсцис, знаходять граничну довжину хвилі λ_2 і енергію квантів, що обумовлює початок фотопровідності.

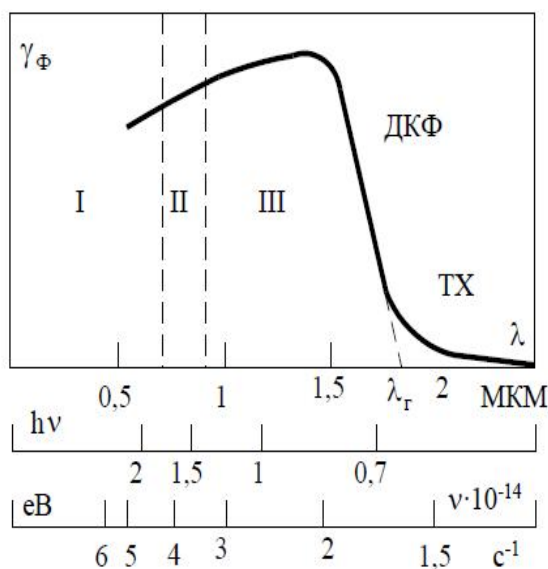


Рис. 7.3 Фотопровідність германію залежно від довжини хвилі випромінювання (I – видима зона спектра, II – червона, III – інфрачервона, ДКФ – довгохвильовий край фотопровідності, ТХ – «тепловий хвіст» кривої)

Оскільки заборонена зона різних напівпровідникових речовин має ширину від десятих часток електрон-вольта до 3 еВ, то фотопровідність може виявлятися в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах електромагнітного спектра. З рис. 7.3 видно, що оптична ширина забороненої зони германію 0,72 еВ, гранична довжина хвилі дорівнює приблизно 1,8 мкм, тобто лежить в інфрачервоній зоні спектра. Фотопровідність при хвилях, коротших 1,8 мкм, визначається переходом електронів з більш низьких рівнів валентної зони на більш високі рівні зони провідності. На кривій рис. 7.3 показаний «тепловий хвіст», що тягнеться до 1,9-2,0 мкм. Наявність його (тобто невеликої фотопровідності) викликана квантами світла з енергією трохи меншою ширини забороненої зони напівпровідника. Це можна пояснити двома фізичними явищами.

1. Окремі електрони можуть знаходитися під впливом енергії фотонів і енергії теплових коливань кристалічних ґраток. Тоді ці електрони перейдуть у зону провідності.

2. Ширина забороненої зони не є абсолютно постійною і

піддається флуктуаціям, тому що теплові коливання ґраток приводять до коливань миттєвої локальної щільності в об'ємі кристала і до зміни миттєвих відстаней між атомами, від яких вона залежить. Фотон з енергією $h\nu < \Delta w$, який поглинено в тому місці об'єму кристала, де миттєва ширина забороненої зони менша середньої, збуджує пари електрон-дірка. Таким чином, «хвіст» кривої на рис. 7.3 має теплову природу.

Германій. Вміст германію в земній корі невеликий, близько $7 \cdot 10^{-4} \%$. У результаті хімічної переробки вихідної сировини утворюється тетрахлорид германію, його шляхом подальших операцій переводять у двоокис германію (Ge_2) – порошок білого кольору. Двоокис германію відновлюється у водневій печі при температурі $650\text{--}700^\circ\text{C}$ до елементарного германію, що являє собою сірий порошок. У ряді випадків порошок германію одержують безпосередньо з GeCl_4 шляхом розкладання цієї сполуки при високій температурі в атмосфері парів цинку. Порошок германію піддають травленню в суміші кислот і сплавляють у злитки. Злитки германію використовують як вихідний матеріал для одержання особливо чистого германію методом зонного плавлення або ж для безпосереднього одержання монокристалів методом витягування з розплаву.

Германій застосовується для виготовлення випрямлячів змінного струму різної потужності, транзисторів різних типів. З нього виготовляють перетворювачі Холла, які застосовуються для вимірювання напруженості магнітного поля, струмів і потужності, множення величин у приладах обчислювальної техніки та ін. Оптичні властивості германію дозволяють використовувати його для фототранзисторів і фоторезисторів, оптичних лінз з великою світлосилою (для інфрачервоних променів), оптичних фільтрів, модуляторів світла і коротких радіохвиль. Внутрішній фотоефект у германії спостерігається й при поглинанні середніх і швидких електронів, а також при гальмуванні елементарних часток великих мас. Так, при поглинанні α -частинки відбувається імпульс струму тривалістю близько $0,5$ мкс, що відповідає проходженню 10^6 електронів. Тому германій може бути використаний і для виготовлення лічильників ядерних частинок. Робочий діапазон температур германієвих приладів від мінус 60 до плюс 70°C ; при підвищенні температури до верхньої межі прямий струм, наприклад, у діодів, збільшується майже в два рази, а зворотний – у три. При охолодженні до мінус $(50\text{--}60)^\circ\text{C}$ прямий струм падає на $70\text{--}75\%$. Германієві прилади повинні бути захищені від дії вологи повітря.

Напівпровідникові сполуки. Вони можуть мати найрізноманітніші електрофізичні властивості. Розглянемо найбільш важливі для електротехніки матеріали.

Карбід кремнію. Це сполука елементів IV групи таблиці Менделєєва кремнію і вуглецю ($\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{IV}}$), що відповідає формулі SiC_x ($x \approx 1$). Карбід кремнію стехіометричного складу містить $70,045\%$ Si і $29,955\%$ C (за масою). У природі цей матеріал зустрічається вкрай рідко і в обмежених кількостях. Залежно від вихідної сировини й особливостей технологічного

процесу виходять кристали різного забарвлення. Колір кристалів Si і тип електропровідності залежать від сторонніх домішок або надлишку атомів Si чи C. Домішки елементів п'ятої групи (N, P, As, Sb, Bi) і заліза в Si дає зелене забарвлення і електропровідність n-типу; елементи другої групи (Ca, Be, Mg) і третьої групи (B, Al, Ga, In) дають блакитне і фіолетове забарвлення (у товстих шарах – чорне) і електропровідність p-типу; надлишок Si дає n-Si, а надлишок C – p-Si. Чисті кристали Si прозорі. Електропровідність кристалів Si за нормальних температур домішкова і коливається в широких межах. Температурні залежності електропровідності електронного і діркового Si показані на рис. 7.4.

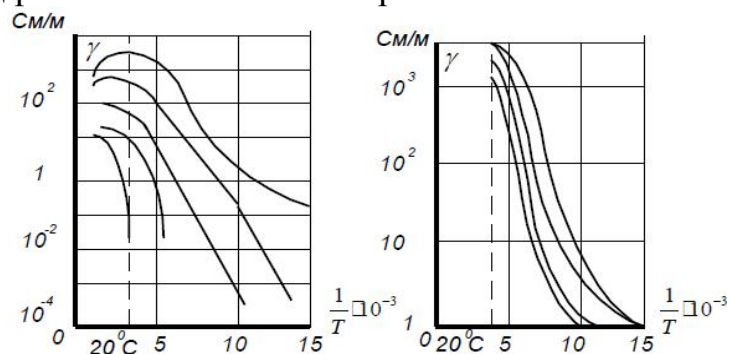


Рис.7.4 – Залежність питомої провідності декількох зразків n-Si (а) і p-Si (б) від температури

Основні фізичні властивості кристалів Si такі:

Густина	3,2 Мг/м ³
Питома теплопровідність при 20°C	10–40 Вт/(м·К)
Питома теплоємність	620–750 Дж(кг·К)
Температурний коефіцієнт лінійного розширення.....	(4–7)·10 ⁻⁶ К ⁻¹
Твердість за мінералогічною шкалою (за Моосом)	9,5
Ширина забороненої зони.....	2,8-3,1 еВ
Рухливість електронів при 20° С.....	0,01–0,05 м ² /(В·с)
Рухливість дірок при 20° С	0,002–0,005 м ² /(В·с)
Діелектрична проникність	6,5–7,5
Термо-е.р.с щодо міді.....	300 мкВ/К

Електропровідність порошкоподібного карбіду кремнію залежить від електропровідності вихідного матеріалу, розміру помолу, ступеня стиску часток, напруженості електричного поля і температури. Наприклад, якщо питома провідність матеріалу приблизно рівна 150 См/м, то при температурі 20°C, розмірі зерна 63–75 мкм і тиску на порошок 60 МПа в зоні слабкого поля (до 5 В на сантиметр висоти порошку) питома провідність порошку буде приблизно 2·10⁻⁶ См/м. При збільшенні зерна до 85–105 мкм і при всіх колишніх умовах питома провідність порошку зростає до значень, більших 10⁻³ См/м. Карбід кремнію в електротехніці знайшов застосування для виготовлення резисторів вентильних розрядників,

що захищають лінії електропередачі високої напруги і апаратуру; для виробництва різних низьковольтних варисторів, використовуваних в автоматичній, обчислювальній техніці, електроприладобудуванні, у техніці високих температур.

Сполуки $A^{III}B^V$ являють собою перспективні матеріали, що обумовлюють широкі можливості вибору параметрів вихідного матеріалу (ширина забороненої зони, рухливість носіїв і т. д.) для створення напівпровідникових приладів. Вони мають структуру сфалериту – цинкової обманки, подібну до структури алмазу з тією відмінністю, що природа і розміри вхідних у першу частинок різні.

Зі сполук $A^{III}B^V$ найбільш дослідженими і технологічно нескладними є фосфіди, арсеніди й антимоніди. Практичне значення в даний час мають арсенід і фосфід галію, антимонід індію. Основним методом одержання сполук $A^{III}B^V$ є безпосередня взаємодія компонентів у вакуумі або в інертному газі. Температури плавлення сполук $A^{III}B^V$ знижуються з ростом суми атомних номерів і атомних мас, які входять у сполуку. Точки плавлення сполук лежать вище відповідних температур плавлення елементів, за винятком антимоніду індію, температура плавлення якого (536°C) лежить між температурами плавлення сурми (630°C) та індію (157°C). Зі збільшенням атомної маси і суми атомних номерів зменшується ширина забороненої зони сполуки, тому що відбувається розмивання «електронних хмар» ковалентних зв'язків і вони все більше наближаються до металевого (стрибкоподібний перехід до металевого зв'язку спостерігається у сплавах індію з вісмутом, галію із сурмою).

Сполуки $A^{II}B^{VI}$ і інші напівпровідникові матеріали. Серед різних напівпровідникових сполук розглянемо деякі сульфіді й окисли, що знайшли найбільш широке технічне застосування.

Сульфіді. Сірчистий свинець (Pb), сірчистий вісмут (Bi_2S_3) і сірчистий кадмій (Cd) використовуються для виготовлення фоторезисторів. Сірчистий свинець зустрічається в природі у вигляді матеріалу галеніту (свинцевий блиск) і може бути отриманий штучно декількома способами, Pb буває в аморфній і кристалічній модифікаціях. Сірчистий вісмут отримують сплавленням вісмуту з сіркою у відсутності кисню. Кристали його належать до ромбічної системи і мають сіро-чорний колір. Сірчистий кадмій отримують різними способами, він може бути аморфним або кристалічним. Колір його залежить від модифікації і вмісту домішок. Деякі властивості сульфідів наведені в табл. 7.1.

Фоторезистори з полікристалічного сірчистого свинцю мають криву спектральної чутливості, що охоплює видимий та інфрачервоний діапазони електромагнітного спектра. Чутливість фоторезисторів із сірчистого вісмуту лежить у вузькій червоній області спектра (рис. 7.5), а фоторезисторів на основі сірчистого кадмію, залежно від змісту домішок і технології виготовлення зразків, може мати максимуми при різних довжинах хвиль видимої частини спектра.

Таблиця 7.1

Деякі властивості сульфідів і окислів

Сполуки	Ширина забороненої зони, еВ	Рухливість електронів, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$
PbS	0,37	0,04	1114
Bi ₂ S ₃	1,25	-	685
CdS	2,1	0,02	1750
CuO	0,22-0,39	-	-
ZnO	3,2	0,01-0,1	-
TiO	3	0,0001	-

Фоторезистори застосовуються для підрахунку деталей у конвеєрному виробництві для контролю рівня рідких і сипучих тіл.

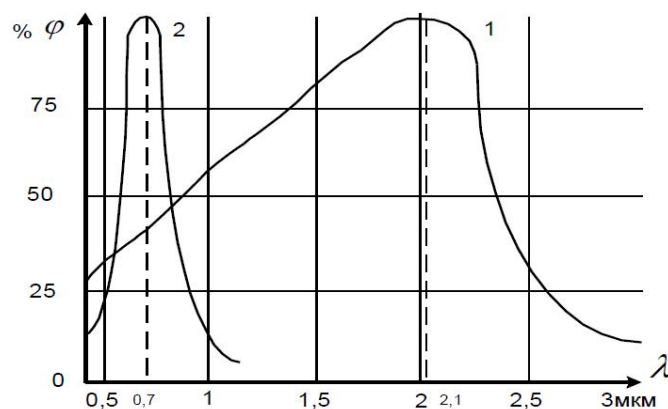


Рис.7.5 Спектральна чутливість при 20°C фоторезисторів з полікристалічного сірчастого свинцю (1) і сірчастого вісмуту (2)

Оксиди. Окис міді (Cu_2O) – речовина малинового кольору – є напівпровідником тільки p -типу (рухливість дірок приблизно $0,01 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Окис міді кристалізується в кубічній системі. Провідність окису міді залежить від сторонніх домішок, термічної обробки й температури. Температурний коефіцієнт лінійного розширення $0,93 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, питома теплопровідність $6,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

З окислених мідних пластин, на поверхні яких утворився шар окису міді, були отримані перші типи напівпровідникових випрямлячів і фотоелементів.

Терморезистори виготовляються у вигляді стержнів, пластинок або таблеток методами керамічної технології. Опір й інші властивості терморезисторів залежать не тільки від складу, але і від розміру зерен, від технологічного процесу виготовлення; тиску при пресуванні (якщо напівпровідник беруть у вигляді порошку) і температури випалювання. Терморезистори використовуються для вимірювання та регулювання температури, та термокомпенсації, для стабілізації напруги, обмеження імпульсних пускових струмів, вимірювання теплопровідності рідин, як

безконтактні реостати і струмові реле часу.

З напівпровідникової кераміки, що має точку Кюрі, виготовляються терморезистори, які відрізняються від усіх інших терморезисторів тим, що мають не від'ємний, а дуже великий додатний температурний коефіцієнт опору (понад $+20\%/K$) у вузькому інтервалі температур (порядку $10^\circ C$). Такі терморезистори називають позисторами. Їх виготовляють у вигляді дисків невеликої товщини і призначають для контролю та регулювання температури, використання в системах пожежної сигналізації, запобігання перегріву двигунів, обмеження струмів, вимірювання потоків рідин і газів.

Напівпровідникові матеріали з великим числом складових знаходять технічне застосування при виготовленні термоелементів, термогенераторів і холодильних пристроїв. До таких матеріалів відносять, наприклад, потрійний сплав Bi-Sb-Zn, що застосовується для додатних областей термоелементів, тверді розчини 0.25 Pb (0.5 PbSe (0.25 PbTe і 0.3 Pb (0.7 PbSe та інші, що йдуть на виготовлення від'ємного електрода термоелементів.

7.3. Послідовність виконання роботи

7.3.1. Активізувати комп'ютерну програму “Самостійна робота № 7” (“Дослідження температурної залежності питомого опору напівпровідникових матеріалів”).

7.3.2. Ввімкнути віртуальні “Омметр” та “Вимірювач температури” (рис. 7.6)

7.3.3. Помістити досліджуваний зразок чистого (власного) германію в термостат. Для цього необхідно “мишкою” активізувати позицію “Германій власний” в таблиці “Вибір напівпровідника”.

7.3.4. Ввімкнути “Термостат”.

7.3.5. Виміряти величину опору зразка власного германію залежно від температури. Температуру змінювати в інтервалі від $20^\circ C$ до $80^\circ C$ через кожні $5^\circ C$. Результати вимірювань занести до таблиці 7.2.

7.3.6. Вимкнути “Термостат”.

7.3.7. Повторити пп. 7.2.3-7.2.6 для германієвого зразка з донорною домішкою.

7.3.8. Результати вимірювань занести до таблиці 7.2.

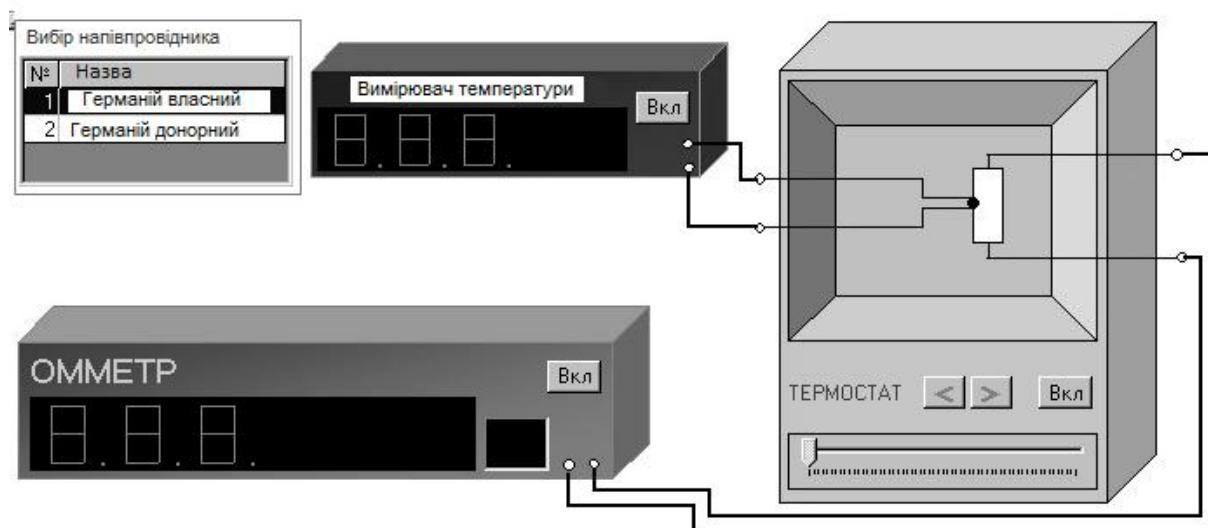


Рис. 7.6 Схема дослідної установки

Таблиця 7.2

Результати дослідів та вимірювань

t, °C	T, K	1/T, K ⁻¹	Власний германій			Домішковий германій		
			R, Ом	ρ, Ом·м	ln ρ	R, Ом	ρ, Ом·м	ln ρ
	Розрахунок			Розрахунок			Розрахунок	
20								
25								
30								
35								
40								
45								
50								
55								
60								
65								
70								
75								
80								

7.4. Обробка результатів вимірювання

7.4.1. Розрахувати за $\rho = R \frac{S}{l}$ формулою, де R – опір напівпровідника

[Ом], ρ – питомий опір напівпровідника [Ом·м], l – довжина зразка [м], S – площа поперечного перерізу прямокутного зразка [м²], питомі опори досліджуваних зразків напівпровідникових матеріалів. Результати розрахунків занести до табл. 7.2. Параметри зразків наведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3

Параметри зразків		
Зразок напівпровідника	Довжина l , м	Розміри поперечного перерізу, мм
Власний германій	10	1,5 x 1,3
Домішковий германій	10	1,2 x 1,4

7.4.2. За результатами розрахунків п. 7.3.1 побудувати в одній системі координат функціональні залежності питомого опору від температури $\rho=f(t^{\circ}C)$ для кожного з досліджуваних напівпровідників.

7.4.3. Розрахувати (результати розрахунку занести до табл. 7.2) та побудувати в одній системі координат функціональні залежності $\ln \rho=f(T^{-1})$, де T – абсолютна температура.

7.4.4. За допомогою графіка залежності $\ln \rho=f(T^{-1})$ власного германію розраховувати кутовий коефіцієнт β за формулою $\beta = \frac{\ln \rho_2 - \ln \rho_1}{T_2^{-1} - T_1^{-1}}$

7.4.5. Визначити ширину забороненої зони ΔE власного германію $\Delta E=2k\beta$, де $k=8.85 \cdot 10^{-5}$ eV/K – стала Больцмана.

7.4.6. Розрахувати концентрацію власних носіїв германію при температурі $T=300$ К за формулою $n_i = [\rho_e(\mu_n + \mu_p)]^{-1}$, де $\mu_n=3800$ см/В·с, $\mu_p=3800$ см/В·с – рухомості відповідно електронів та "дірок", e – заряд електрона.

7.4.7. Розрахувати концентрацію власних донорів домішкового германію при температурі $T=300$ К за формулою $n_d = (\rho_e \mu_n)^{-1}$.

7.4.8. Зробити висновок.

7.5. Зміст звіту.

7.5.1. Мета та програма роботи.

7.5.2. Порядок виконання лабораторної роботи.

7.5.3. Таблиці з виміряними та розрахованими даними.

7.5.4. Графіки залежностей.

7.5.5. Висновки за результатами виконаної роботи.

7.5.6. Список використаної літератури.

7.6. *Контрольні питання*

7.6.1. Назвіть напівпровідникові матеріали, які використовують при виготовленні елементної бази електронної апаратури.

7.6.2. Власні напівпровідники.

7.6.3. Наведіть основні фізичні властивості кремнію, германію, арсеніду галію.

7.6.4. Домішкові напівпровідники.

7.6.5. Акцепторні домішки.

7.6.6. Донорні домішки.

7.6.7. Фізична суть електронної провідності.

7.6.8. Фізична суть “діркової” провідності.

7.6.9. Чим відрізняється температурна залежність питомого опору власного напівпровідника від домішкового?

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

8.1. Мета роботи

Провести комп'ютерне моделювання й дослідити вплив зміни температури на питомий опір металевих провідників.

8.2. Основні теоретичні відомості

До найважливіших параметрів, що характеризують властивості провідникових матеріалів, належать:

- питома провідність γ або обернена їй величина – питомий опір ρ ;
- температурний коефіцієнт питомого опору (TK_ρ) або α_p ;
- теплопровідність γ_e ;
- контактна різниця потенціалів і термоелектрорушійна сила (термо-е.р.с.);
- робота виходу електронів з металу;
- межа міцності при розтяганні σ_p і відносне подовження при розриві $\Delta l/l$.

Питома провідність і питомий опір провідників. Зв'язок щільності струму J , А/м² і напруженості електричного поля E , В/м у провіднику визначається формулою:

$$J = \gamma \cdot E, \quad (8.1)$$

де γ , См/м – питома провідність провідникового матеріалу.

Відповідно до закону Ома γ не залежить від напруженості електричного поля E при зміні останньої в досить широких межах. Величина $\rho = 1/\gamma$, обернена питомій провідності, називається питомим опором для провідника, що має опір R , довжину l , з постійним перерізом S , і обчислюється за формулою:

$$\rho = R \cdot S / l. \quad (8.2)$$

Температурний коефіцієнт питомого опору металів. Число носіїв заряду (концентрація вільних електронів) у металевому провіднику при підвищенні температури залишається практично незмінним. Однак внаслідок посилень коливань вузлів кристалічних ґраток з ростом температури з'являється більше завад на шляху спрямованого руху вільних електронів під дією електричного поля, тобто зменшується середня довжина вільного пробігу електрона λ , зменшується рухливість електронів i , як наслідок, зменшується питома провідність металів і зростає питомий опір. Іншими словами, температурний коефіцієнт питомого опору металів (K^{-1}) додатний:

$$\alpha_p = TK_p = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{\rho \cdot dt} \quad (8.3)$$

При зміні температури у невеликих діапазонах на практиці допустимо використання формули:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot [1 + \alpha_p \cdot (T_2 - T_1)], \quad (8.4)$$

де ρ_1, ρ_2 – питомі опори провідникового матеріалу при температурах T_1 і T_2 (при цьому $T_1 > T_2$); α_p – середній температурний коефіцієнт питомого опору матеріалу в діапазоні температур від T_1 до T_2 .

Теплопровідність металів. Передача тепла через метал відбувається вільними електронами, що визначають і електропровідність металів, кількість яких в одиниці об'єму металу досить велика. Тому, як правило, теплопровідність γ_m металів набагато більша, ніж теплопровідність діелектриків. Очевидно, що за інших рівних умов, чим більша питома електрична провідність γ металу, тим більша повинна бути і його теплопровідність. При підвищенні температури, коли рухливість електронів у металі й, відповідно, його питома провідність γ зменшуються, відношення γ_m/γ теплопровідності металу до його питомої провідності повинно зростати. Математично це виражається законом Відемана-Франца-Лоренца:

$$\gamma_m / \gamma = L_0 \cdot T, \quad (8.5)$$

де T – абсолютна температура, К; L_0 – число Лоренца, що дорівнює:

$$L_0 = \frac{\pi^2 \cdot k^2}{3e^2} \quad (8.6)$$

Термоелектрорушійна сила. При спаюванні двох різних металевих провідників між ними виникає контактна різниця потенціалів. Причина її появи полягає в розходженні значень роботи виходу електронів з різних металів, а також в різній концентрації електронів в місті контакту. З електронної теорії металів контактна різниця потенціалів між металами A і B визначається:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) \quad (8.7)$$

де U_A, U_B – потенціали з'єднаних металів; n_A, n_B – концентрації електронів у металах A і B ; k, e – стала Больцмана і заряд електрона.

Якщо температури «спаїв» однакові, то сума різниць потенціалів у замкнутому ланцюзі дорівнює нулеві. Коли один зі спаїв має температуру T_1 а інший – температуру T_2 , між спаями виникає термоелектрорушійна сила:

$$U = U_{AB} - U_{BA} = U_B - U_A + \frac{k \cdot T_1}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) + U_A - U_B + \frac{k \cdot T_2}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) = \frac{k}{e} \cdot (T_2 - T_1) \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) \quad (8.9)$$

Термо-е.р.с. пропорційна різниці температур спаїв.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення провідників. При виготовленні елементів конструкцій часто використовують матеріали з різними значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення, наприклад, метал-скло або метал-кераміка та інші. При зміні температури

може виникнути порушення щільності з'єднань і навіть розтріскування скла або кераміки. Тому при підборі матеріалів необхідно добиватись максимально близьких значень їхніх коефіцієнтів лінійного розширення. Він також використовується і для розрахунку температурного коефіцієнта електричного опору провідникових матеріалів:

$$TK\rho = \alpha_R = \alpha \cdot \rho - \alpha_1 \quad (8.10)$$

Механічні властивості провідників характеризуються межею міцності при розтяганні σ_p і відносним подовженням при розриві $\Delta l/l$, а також крихкістю, твердістю та ін. Механічні властивості металевих провідників великою мірою залежать від механічної й термічної обробки, від наявності легувальних домішок, температури плавлення і кипіння, питомої теплоємності та ін.

Надпровідники. При зниженні температури питомий опір ρ металів зменшується. А при досягненні криогенних температур, що наближаються до абсолютного нуля, раптово, різким стрибком падає до надзвичайно малого значення. Це зникнення електричного опору, тобто поява практично нескінченної питомої провідності матеріалу, було названо надпровідністю, а температура, при охолодженні до якої відбувається перехід речовини у надпровідний стан, – температурою надпровідного переходу T_c . Крім ртуті є багато інших матеріалів, і не тільки чистих металів, але й різних сплавів і хімічних сполук, здатних при охолодженні до досить низької температури переходити у надпровідний стан.

Деякі речовини, у тому числі такі найкращі провідникові матеріали, як срібло і мідь, при найбільш низьких, досягнутих у даний час температурах, перевести у надпровідний стан не вдається. Надпровідниками можуть бути не лише сполуки і сплави металів, яким характерна надпровідність, але й сполуки, до складу молекул яких входять винятково атоми елементів, що не є надпровідниками. На рис. 8.1 показано зміну опору при глибокому охолодженні зразків ртуті, яка є типовим надпровідником, і платини, що не належить до надпровідників (по осі абсцис відкладена абсолютна температура в Кельвінах, а по осі ординат – відношення опору зразка при даній температурі R_T до опору R_{273} при температурі $T = 273 \text{ K} = 0^\circ\text{C}$).

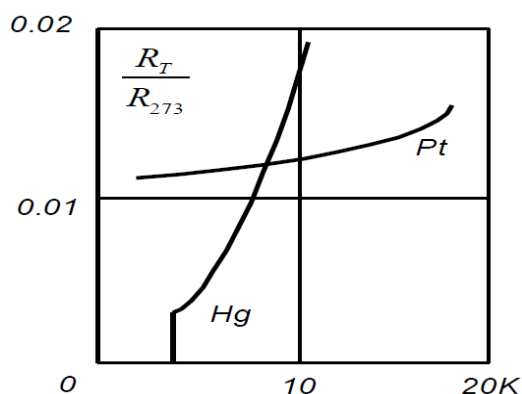


Рис. 8.1 Зміна опору зразків ртуті та платини при глибокому охолодженні

Явище надпровідності пов'язане з тим, що електричний струм, один раз наведений у надпровідниковому контурі, буде довго циркулювати по цьому контуру без помітного зменшення. Такий надпровідний контур створює в навколишньому просторі магнітне поле, подібно постійному магнітові, що не вимагає живлення від джерела струму.

Матеріали високої провідності. Вони використовуються для виготовлення обмоток електричних машин, апаратів, приладів і для передачі електричної енергії.

До матеріалів з малим питомим опором висуваються такі вимоги: низьке значення питомого опору та температурного коефіцієнта питомого опору; досить висока механічна міцність; здатність легко оброблятися; здатність добре зварюватися і створювати при цьому надійні сполуки з малим електричним опором; достатня корозійна стійкість. Найбільш широко застосовуються як провідникові матеріали з високою провідністю мідь і алюміній.

Мідь. Переваги міді, що забезпечують їй широке застосування як провідникового матеріалу, такі: 1) малий питомий опір (із усіх металів тільки срібло має трохи менший питомий опір, ніж мідь); 2) досить висока механічна міцність; 3) задовільна, в більшості випадків, стійкість до корозії (мідь окисляється на повітрі навіть в умовах високої вологості значно повільніше, ніж, наприклад, залізо; інтенсивне окислення міді відбувається тільки при підвищених температурах); 4) добра оброблюваність; 5) відносна легкість паяння і зварювання.

Марки міді. Як провідниковий матеріал використовується мідь марок M_1 і M_0 . Мідь марки M_1 містить 99,9% Cu, а в загальній кількості домішок (0,1%) кисню повинно бути не більш 0,08%. Присутність у міді кисню погіршує її механічні властивості. Кращі механічні властивості у міді марки M_0 , у якій до 0,05% домішок, у тому числі до 0,02% кисню. З міді марки M_0 виготовляють тонкі провідники. При холодному протягуванні одержують тверду (твердотянуту) мідь (M_T), яка має високу міцність при розтяганні і мале відносне подовження при розриві, а також твердість і пружність при вигині.

Стандартна мідь при 20 °C має питому провідність 58 МСм/м, тобто $\rho = 0,017241$ мкОм·м. Нормовані властивості твердої і м'якої міді (а також, для порівняння, алюмінію) наведені в табл. 8.1.

Тверду мідь використовують там, де треба забезпечити особливо високу механічну міцність, твердість і опір стиранню: для контактних проводів, для шин розподільних пристроїв, для колекторних пластин електричних машин та іншого. М'яку мідь у вигляді проводів круглого і прямокутного перерізу застосовують, головним чином, як струмопровідні жили кабелів і обмотувальних проводів, де важливі гнучкість і пластичність.

Мідь є порівняно дорогим і дефіцитним матеріалом. Відходи міді на електротехнічних підприємствах необхідно ретельно збирати; важливо не

змішувати їх з іншими металами, а також з менш чистою (не електротехнічною) міддю, щоб можна було піддати ці відходи переплавляння і знову використовувати як електротехнічну мідь. Мідь як провідниковий матеріал усе ширше замінюється іншими металами, особливо алюмінієм.

Таблиця 8.1

Властивості мідних та алюмінієвих проводів

Параметр	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Межа міцності при розтяганні σ_r , МПа, не менше	360-390	260-280	160-170	80
Відносне подовження при розриві $\Delta l/t$, %, не менше	0,5-2,5	18-35	1,5-2	10-18
Питомий опір ρ , мкОм м, не більше	0,0179-0,0182	0,01754	0,0295	0,0290

Алюміній є другим за значенням (після міді) провідниковим матеріалом. Алюміній належить до легких металів (із щільністю менше 5 Мг/м^3): густина литого алюмінію близько $2,6 \text{ Мг/м}^3$; а прокатаного – $2,7 \text{ Мг/м}^3$.

Таким чином, алюміній приблизно в 3,5 раза легший міді. Температурний коефіцієнт лінійного розширення, питома теплоємність алюмінію більші, ніж міді. Алюміній порівняно з міддю має дещо гірші властивості – (як механічні, так і електричні). При однаковому перерізі і довжині електричний опір алюмінієвого проводу більший, ніж мідного у 1,63 раза. Отже, щоб одержати алюмінієвий провід такого ж електричного опору, як і мідний, потрібно взяти його переріз у 1,63 раза більшим, тобто його діаметр повинний бути в 1,3 раза більшим від діаметра мідного проводу. Якщо ж порівняти за масою два відрізки алюмінієвого і мідного проводів однієї довжини і того самого опору, то виявиться, що алюмінієвий провід хоча і товщий мідного, але легший від нього приблизно в два рази. Тому для виготовлення проводів однієї і тієї ж провідності при даній довжині алюміній вигідніший міді якщо тонна алюмінію дорожча від тонни міді не більше, ніж у два рази. Досить важливо, що алюміній менш дефіцитний, ніж мідь. У даний час алюміній не тільки замінив мідь у повітряних лініях електропередачі, але впроваджується й у виробництво ізолюваних кабельних виробів.

Для електротехнічних цілей використовують алюміній, що містить не більше 0,5% домішок, марка A_1 . Ще більш чистий алюміній марки АВ00 (не більше 0,03% домішок) застосовують для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів і корпусів електролітичних

конденсаторів. Алюміній найвищої чистоти АВ0000 має вміст домішок, що не перевищує 0,004%. Різні домішки різною мірою знижують питому провідність γ алюмінію. Домішки Ni, Si, Zn або Fe при вмісті їх 0,5% знижують у відпаленого алюмінію питому провідність не більше ніж на 2-3%. Більш помітну дію роблять домішки Си, Ag і Mg, при тому ж масовому вмісті понижують γ алюмінію на 5-10%. Дуже сильно знижують γ алюмінію домішки Ti і Mn. Прокатування, протягання й випалювання алюмінію аналогічні відповідним операціям над міддю. З алюмінію може прокачуватися тонка (до 6-7 мкм) фольга, що застосовується як обкладинки в паперових і плівкових конденсаторах. Властивості твердого і м'якого алюмінієвого проводу наведені в табл. 8.1. Алюміній досить активно окисляється і покривається тонкою окисною плівкою з великим електричним опором. Ця плівка захищає алюміній від подальшої корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів і робить неможливим паяння алюмінію звичайними методами. У місцях контакту алюмінію і міді можлива гальванічна корозія. Якщо область контакту піддається дії вологи, то виникає місцева гальванічна пара з досить високим значенням е.р.с., причому полярність цієї пари така, що на зовнішній поверхні контакту струм йде від алюмінію до міді, й алюмінієвий провідник може бути сильно зруйнований корозією. Тому місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні ретельно захищатися від зволоження. Іноді, наприклад, для заміни свинцю в захисних кабельних оболонках, використовується алюміній зі змістом домішок не більше 0,01% (замість 0,5% для звичайного провідникового алюмінію).

Сталеалюмінієвий провід широко застосовується у лініях електропередачі і являє собою осердя, збите зі сталевих жил і оповите зовні алюмінієвим проводом. У проводах такого типу механічна міцність визначається, головним чином, сталевим осердям, а електрична провідність – алюмінієм. Збільшений зовнішній діаметр сталеалюмінієвого проводу порівняно з мідним на лініях передачі високої напруги є перевагою, тому що зменшується небезпека виникнення корони внаслідок зниження напруженості електричного поля на поверхні проводу.

Сплави міді. В окремих випадках, крім чистої міді, застосовуються її сплави з оловом, кремнієм, фосфором, берилієм, хромом, магнієм, кадмієм. Такі сплави, що носять назву бронз (табл. 8.2), при правильно підбраному складі мають значно більш високі механічні властивості, ніж чиста мідь: ζ_p бронз може бути 800–1200 МПа і більше. Бронзи широко застосовують для виготовлення струмопровідних пружин та іншого. Введення в мідь кадмію при порівняно малому зниженні питомої провідності (рис. 8.2) дає значне підвищення механічної міцності і твердості.

Кадмієву бронзу застосовують для контактних проводів і колекторних пластин особливо відповідального призначення. Ще більша

механічна міцність у берилієвої бронзи (ζ_p до 1350 МПа). Сплав міді з цинком – це латунь, яка має досить високе відносне подовження перед розривом при підвищеній, порівняно з чистою міддю, межі міцності при розтяганні. Це дає латуні технологічні переваги над міддю при обробці штампуванням, глибоким витягуванням. Відповідно до цього латунь застосовують в електротехніці для виготовлення різних струмопровідних деталей.

Таблиця 8.2

Властивості мідних електротехнічних сплавів

Сплав	Стан	Питома провідність γ , % відносно міді	Межа міцності при розриві МПа	Відносне подовження при розриві $\Delta l/l$, %
Кадмієва бронза (0,9% Cd)	Тверда Відпалена	83–90 95	до 1050 310	4 до 50
Бронза (0,8% Cd, 0,6 Sn)	Тверда Відпалена	50–55 55–60	до 730 290	4 до 55
Бронза (2,5% Al, 2% Sn)	Тверда Відпалена	15–18 15–18	до 970 370	4 до 45
Фосфориста бронза (7% Sn, 0,1% P)	Тверда Відпалена	10–15 10–15	до 1050 400	3 до 60
Латунь (30% Zn)	Тверда Відпалена	25 25	до 880 320–350	5 до 60–70

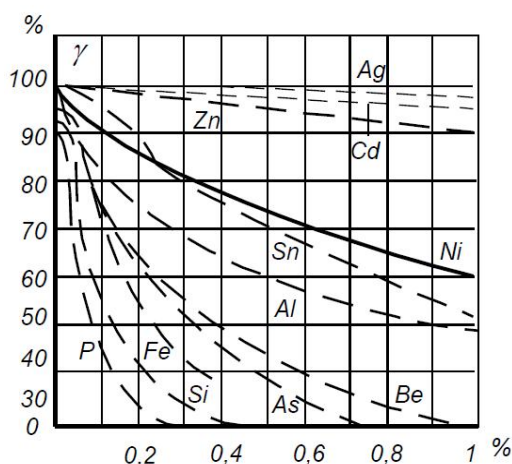


Рис. 8.2 Залежності питомої провідності міді від вмісту домішок у % від маси (провідність чистої міді прийнята за 100%, домішки зазначені на кривих)

Кадмієву бронзу застосовують для контактних проводів і

колекторних пластин особливо відповідального призначення. Ще більша механічна міцність у берилієвої бронзи (ζ_p до 1350 МПа). Сплав міді з цинком – це латунь, яка має досить високе відносне подовження перед розривом при підвищеній, порівняно з чистою міддю, межі міцності при розтяганні. Це дає латуні технологічні переваги над міддю при обробці штампуванням, глибоким витягуванням. Відповідно до цього латунь застосовують в електротехніці для виготовлення різних струмопровідних деталей.

Алюмінієві сплави мають підвищену механічну міцність. Прикладом такого сплаву є альдрей, що містить 0,3–0,5% Mg, 0,4–0,7% Si і 0,2–0,3% Fe (інше Al). Високих механічних властивостей альдрей набуває після особливої обробки (загартування катанки, охолодження у воді з температурою 510–550° С, волочіння і наступна витримка при температурі близько 150°С). Альдрей у вигляді проводу має густину 2,7 Мг/м³, його $\zeta_p = 350$ МПа, $\Delta l/l = 6,5\%$; $\alpha_l = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 0,0317$ мкОм·м, $\alpha_p = 0,0036 \text{ K}^{-1}$. Таким чином, альдрей, практично зберігаючи легкість алюмінію, є досить близьким до нього за питомою провідністю, у той же час за механічною міцністю наближається до твердої міді. У даний час розроблені алюмінієві сплави типу альдрея, які не потребують термічної обробки.

Сплави високого опору. З металевих провідникових матеріалів можуть бути виділені метали високої провідності, що мають питомий опір ρ за нормальної температури не більше 0,05 мкОм·м, і сплави високого опору з ρ за нормальної температури не менше 0,3 мкОм·м. Метали і сплави високого опору застосовуються для виготовлення резисторів, електронагрівальних приладів, ламп розжарювання та іншого. При використанні цих сплавів для електровимірювальних приладів і зразкових резисторів, крім високого питомого опору ρ , потрібні також висока стабільність ρ у часі, малий температурний коефіцієнт питомого опору α_p і малий коефіцієнт термо-е.р.с. у парі даного сплаву з міддю. Сплави для електронагрівальних елементів повинні довго працювати на повітрі при високих температурах (до 1000°С і навіть вище). Крім того, у багатьох випадках потрібна технологічність сплавів – можливість виготовлення з них гнучкого проводу, іноді досить тонкого (діаметром порядку сотих часток міліметра). Бажано, щоб сплави, які використовуються для приладів, вироблених у великих кількостях – реостатів, електроплиток, електричних чайників, паяльників та інші – були дешевими і, по можливості, не містили дефіцитних компонентів.

Манганін. Це найбільш широко застосовуваний для виготовлення зразкових резисторів сплав. Зразковий склад його: Cu – 85%, Mn – 12%, Ni – 3%; назва походить від наявності в ньому марганцю (латинське *manganum*); жовтуватий колір пояснюється великим вмістом міді. Значення ρ манганіну – 0,42–0,48 мкОм·м, α_p досить малий, $(6-50) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, коефіцієнт термо-е.р.с. у парі з міддю лише 1–2 мкВ/К. Манганін може витягатися в тонкий (до діаметра 0,02 мм) провід і часто випускається з емалевою ізоляцією. Для забезпечення малого значення α_p і стабільності ρ

в часі манганіновий провід піддається спеціальній термообробці (обпалення у вакуумі при температурі 550-600°C з наступним повільним охолодженням; намотані котушки іноді додатково обпалюються при 200°C). Гранична довгостроково припустима робоча температура сплавів типу манганіну не більша 200°C; механічні властивості: $\zeta_p = 450 \div 600$ МПа, $\Delta l/l = 15 \div 30\%$. Густина манганіну 8,4 Мг/м³.

Константан – сплав, що містить близько 60% міді і 40% нікелю; цей склад відповідає мінімумові α_p в системі Cu-Ni при досить високому значенні ρ . Назва «константан» відповідає значною сталістю ρ при зміні температури (для сплавів типу константану α_p при нормальній температурі складає мінус $(5-25) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при ($\rho = 0,48 \div 0,52$ мкОм·м). За механічними властивостями константан близький до манганіну ($\zeta_p = 400 \div 500$ МПа, $\Delta l/l = 20 \div 40\%$). Його густина 8,9 Мг/м³. Нагрівостійкість константану вища, ніж манганіну: константан можна застосовувати для виготовлення реостатів і електронагрівальних елементів, що довгостроково працюють при температурі 450°C.

Істотною відмінністю константану від манганіну є висока термо-е.р.с. в парі з міддю, а також із залізом. Його коефіцієнт термо-е.р.с. у парі з міддю складає 45–55 мкВ/К. Це є недоліком при використанні константанових резисторів у вимірювальних схемах; при наявності різниці температур у місцях контакту константанових провідників з мідними виникають термоелектрорушійні сили, що можуть стати джерелом похибок, особливо при мостових і потенціометричних методах вимірювань. Проте константан з успіхом може бути використаний при виготовленні термопар, що служать для вимірювання температури, якщо остання не перевищує декількох сотень градусів.

Широкому застосуванню константану перешкоджає великий вміст у його складі дорогого і дефіцитного нікелю.

Сплави на основі заліза. Ці сплави в основному застосовуються для електронагрівальних елементів. Висока нагрівостійкість таких елементів пояснюється введенням у їхній склад досить великих кількостей металів, що мають велике значення об'ємного коефіцієнта окисації K , і тому при нагріванні на повітрі утворюється суцільна оксидна плівка. Такими металами є нікель, хром і алюміній. Залізо має об'ємний коефіцієнт окисації менший одиниці і тому при нагріванні легко окисляється; чим більший вміст заліза в сплаві, наприклад, з Ni і Cr, тим менш нагрівостійкий цей сплав.

Сплави системи Fe-Ni-Cr називаються ніхромами або фероніхромами; сплави системи Fe-Cr-Al називаються фехралями і хромаліями. Слід зауважити, що для різних сплавів за прийнятими стандартами часто застосовуються умовні позначки, що складаються з букв і чисел. Букви ці позначають найбільш характерні елементи, що входять до складу сплаву, причому буква входить у назву елемента, але не обов'язково є першою буквою цієї назви (наприклад, Б означає ніобій, В –

вольфрам, Г – марганець, Д – мідь, К – кобальт, Л – берилій, Н – нікель, Т – титан, Х – хром, Ю – алюміній), а число – приблизний вміст даного компонента в сплаві (у відсотках за масою); додаткові цифри на початку позначення визначають підвищену (цифра 0) або знижену якість сплаву.

Стійкість хромонікелевих сплавів за високої температури в повітряному середовищі пояснюється близькими значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення цих сплавів і їхніх оксидних плівок. Тому розтріскування оксидних плівок має місце тільки при різких змінах температури. Тривалість роботи електронагрівальних елементів з ніхрому й аналогічних сплавів може бути в багато разів збільшена при унеможливленні доступу кисню до поверхні провідників. У трубчастих нагрівальних елементах провід зі сплаву високого опору проходить по осі трубки зі стійкого до окислювання металу; проміжок між проводом і трубкою заповнюється порошком діелектрика з високою теплопровідністю (наприклад, магnezією Mg). При додатковому протяганні такої трубки її зовнішній діаметр зменшується, магnezія ущільнюється і утворює механічно міцну ізоляцію внутрішнього провідника. Такі нагрівальні елементи застосовуються, наприклад, в електричних кип'ятильниках; вони можуть працювати досить довгостроково без пошкоджень. Механічні параметри ніхромів: $\zeta_p = 650 \div 700 \text{ МПа}$, $\Delta l/l = 25 \div 30\%$. Ніхроми досить технологічні, їх можна легко протягати в порівняно тонкий провід або стрічку, вони мають високу робочу температуру. Однак, як і в константані, у цих сплавах великий вміст дорогого і дефіцитного компонента – нікелю.

Хромоалюмінієві сплави (фехраль, хромаль) набагато дешевші ніхромів, тому що хром і алюміній порівняно дешеві і легко доступні. Однак ці сплави менш технологічні, більш тверді і тендітні, з них можуть бути отримані проводи і стрічки лише більшого поперечного перерізу, ніж з ніхромів. Тому ці сплави в основному використовуються в електротермічній техніці для електронагрівальних пристроїв великої потужності і промислових електричних печей. Вони мають високу механічну міцність ($\zeta_p = 700 \div 800 \text{ МПа}$ при $\Delta l/l = 10 \div 20\%$). Густина цих сплавів перебуває в межах від 6,9 до 7,5 Мг/м³.

При використанні сплавів високого опору для електровимірювальних приладів і зразкових резисторів, крім високого питомого опору ρ , потрібні також висока стабільність ρ в часі, малий температурний коефіцієнт питомого опору α_ρ і малий коефіцієнт термо-е.р.с. у парі даного сплаву з міддю. Крім того, у багатьох випадках потрібна технологічність сплавів – можливість виготовлення з них гнучкого проводу, іноді досить тонкого (діаметром порядку сотих часток міліметра).

У ряді випадків для зменшення витрати кольорових металів у провідникових конструкціях вигідно застосовувати так званий провідниковий біметал. Це сталь, покрита зовні шаром міді, причому

обидва метали з'єднані один з одним міцно по всій поверхні.

Біметал. Для виготовлення біметалу застосовують два способи: гарячий (сталеву болванку ставлять у форму, а проміжок між болванкою і стінками форми заливають розплавленою міддю, отриману після охолодження біметалеву болванку піддають прокатуванню і протяганню) і холодний, або електролітичний (мідь осаджують електролітично на сталевий провід, що пропускається через ванну з розчином мідного купоросу). Холодний спосіб забезпечує велику рівномірність товщини мідного покриття, але вимагає значної витрати електроенергії. Крім того, при холодному способі не забезпечується настільки міцне зчеплення міді зі сталлю, як при гарячому.

Біметал має механічні й електричні властивості, проміжні між властивостями суцільного мідного і суцільного сталевих провідників того ж перерізу: міцність біметалу більша, ніж міді, але електрична провідність менша. Розташування міді в зовнішньому шарі, а сталі всередині конструкції, а не навпаки, досить важливе: з одного боку, при змінному струмі досягається більш висока провідність усього проводу у цілому, з іншого боку – мідь захищає розташовану під нею сталь від корозії. Біметалевий провід випускається зовнішнім діаметром від 1 до 4 мм зі вмістом міді не менше 50% повної маси проводу. Значення σ_p (з розрахунку на повний переріз проводу) повинне бути не менше 550 – 700 МПа, а $\Delta l/l$ не більше 2%. Такий провід застосовують для ліній зв'язку, ліній електропередачі. Із провідникового біметалу виготовляються шини для розподільних пристроїв, смуги для рубильників і різні струмопровідні частини електричних апаратів.

8.3. Послідовність виконання роботи

8.3.1. Активізувати комп'ютерну програму (Самостійна робота № 8 “Дослідження температурної залежності питомого опору провідникових матеріалів”).

8.3.2. Ввімкнути віртуальні “Омметр” та “Вимірювач температури” (рис. 8.3).

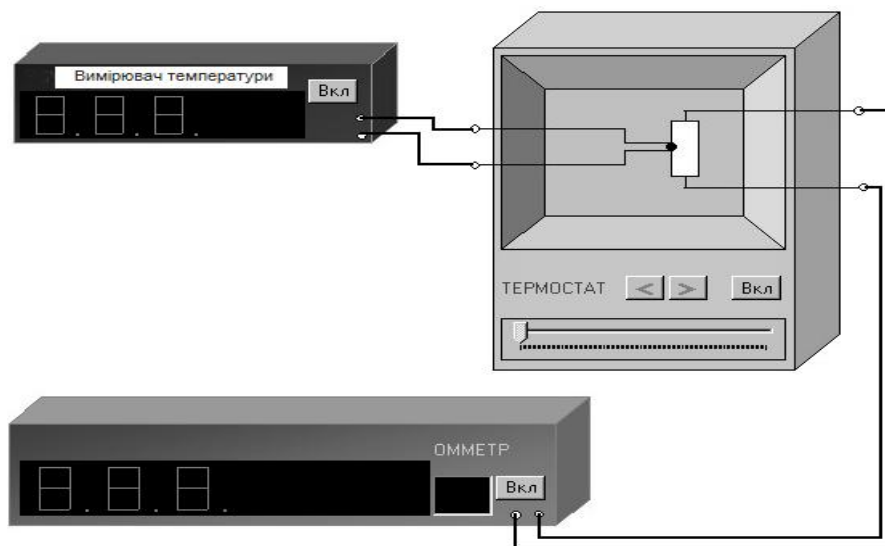


Рис. 8.3 Схема дослідної установки

8.3.3. Помістити досліджуваний зразок “Мідь” (“Cu 100%”) в термостат. Для цього необхідно “мишкою” активізувати позицію “Cu 100%” в таблиці “Вибір провідника” (рис. 8.4).

Вибір провідника

N	Склад	Довжина, м	Діам., мм
1	Cu 100%	5,1	0,1
2	Cu 20% Ni 80%	7,7	0,12
3	Cu 15% Ni 85%	8,7	0,17
4	Cu 40% Ni 60%	6,2	0,18
5	Ni 100%	2,2	0,4

Рис. 8.4 Таблиця характеристик досліджуваних матеріалів

8.3.4. Ввімкнути “Термостат”.

8.3.5. Виміряти величину опору мідного зразка залежно від температури. Температуру змінювати в інтервалі від 0 °C до 100°C через кожні 10°C.

Результати вимірювань занести до таблиці 8.3.

8.3.6. Вимкнути “Термостат”.

8.3.7. Повторити пп. 8.2.3-8.2.5 для зразків сплавів з міді та нікелю:

- Cu 20% Ni 80%;
- Cu 15% Ni 85%;
- Cu 40% Ni 60%.

Результати вимірювань занести до таблиці 8.3.

8.3.8. Повторити пп. 8.2.3-8.2.5 для зразка з нікелю “Ni 100%”.
Результати вимірювань занести до таблиці 8.3.

Таблиця 8.3

Результати вимірювань

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Cu 100%	R, Ом											
	$\rho \times 10^{-6}$, Ом·м											
Cu 20% Ni 80%	R, Ом											
	$\rho \times 10^{-6}$, Ом·м											
Cu 15% Ni 85%	R, Ом											
	$\rho \times 10^{-6}$, Ом·м											

8.4. Обробка результатів вимірювання

8.4.1. Розрахувати за формулою $\rho = R/l$,

де R – опір провідника [Ом], ρ – питомий опір провідника [Ом·м], l – довжина проводу [м], S – площа поперечного перерізу проводу [м²], питомі опори досліджуваних зразків провідникових матеріалів.

Результати розрахунків занести до таблиці 8.3.

8.4.2. За результатами розрахунків п. 8.3.1 побудувати в одній системі координат функціональні залежності питомого опору від температури $\rho = f(t^\circ\text{C})$ для кожного з досліджуваних провідників.

8.4.3. За нахилом побудованих в п. 2 залежностей $\rho = f(t^\circ\text{C})$ на підставі формули $\alpha_\rho = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1(t_1 - t_2)}$, де ρ_1 – питомий опір зразка за температури t_1 , ρ_2 – питомий опір зразка за температури t_2 , визначити температурний коефіцієнт питомого опору (ТКПО) α_ρ .

8.4.4. Порівняти експериментальні дані з довідниковими.

8.4.5. Зробити висновки.

8.5. Зміст звіту

8.5.1. Мета роботи.

8.5.2. Порядок виконання самостійної роботи.

8.5.3. Таблиці з виміряними та розрахованими даними.

8.5.4. Графіки.

8.5.5. Результати розрахунків.

8.5.6. Висновки за результатами виконаної роботи.

8.5.7. Список використаної літератури.

8.6. Контрольні питання

8.6.1. Які матеріали називають провідниками?

8.6.2. Наведіть класифікацію провідникових матеріалів.

8.6.3. Яка природа електропровідності провідників першого роду?

8.6.4. Назвіть основні електричні параметри провідників.

8.6.5. Що називають питомим електричним опором та питомою електричною провідністю?

8.6.6. Дайте означення температурного коефіцієнта питомого електричного опору.

8.6.7. Назвіть провідникові матеріали, які належать до провідників високого опору.

8.6.8. Наведіть формулу, за якою можна визначити опір проводу довжиною l та площею поперечного перерізу S .

8.6.9. Як залежить питомий опір металевих провідників від температури та домішок?

8.6.10. Наведіть формулу залежності опору проводу від його температури.

8.6.11. Назвіть провідникові матеріали та елементи і пристрої електричних кіл, для виготовлення яких використовують дані матеріали.

ВИСНОВКИ

В даних методичних рекомендаціях, який відповідає дисциплінам “Електротехнічні матеріали”, розглянуті питання, які забезпечують більш глибоке засвоєння теоретичного матеріалу і якісне виконання самостійних робіт, а також ознайомлення з основними електротехнічними матеріалами, які застосовуються в електроенергетиці, та їхніми основними властивостями

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Корицкий Ю. В. Справочник по электротехническим материалам / Ю. В. Корицкий. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с. – (3-е изд., перераб.).
2. Богородицкий Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Ленингр: Л. : Энергоатомиздат., 1982. – 320 с. – ([7-е, перераб. и доп.]).
3. Колесов С. Н. Электротехнические и конструкционные материалы / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Украины,: К. : Транспорт, 2003. – 376 с. – ([учебник для студ. электротехн. и электромех. спец. транспортных и других вузов]).
4. Пасынков В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков., 1980. – 408 с.
5. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар., 2006. – 312 с.
6. Колесов С. Н. Электроматериаловедение / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2007. – 476 с. – ([учебник для студ. электротехн. и электромех. спец. вузов]).

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні рекомендації

Укладачі: **Плахтир Олег Олегович**
Циганов Олександр Миколайович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. акр. 13,14.
Тираж 50 прим. Зам №_____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р