

**Міністерство освіти і науки України  
Луцький НТУ**

**В.В. Лишук**

## **ЕЛЕКТРОРАДІОМАТЕРІАЛИ**

Навчальний посібник

*Рекомендовано Вченою радою Луцького НТУ  
як навчальний посібник*

Інформаційно-видавничий відділ  
Луцького НТУ  
Луцьк 2016

УДК 621.396(075.8)  
ББК 32.844 я73  
Л67

*Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького НТУ  
(протокол №12 від 24 травня 2016 р.)*

**Рецензенти:** професор кафедри матеріалознавства та пластичного формування конструкцій машинобудування Луцького НТУ, доктор технічних наук П.П. Савчук

професор кафедри напівпровідникової електроніки НУ «Львівська політехніка», доктор фізико-математичних наук Я.С. Буджак

професор кафедри експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій СНУ ім. Лесі Українки, доктор фізико-математичних наук С.А. Федосов

**Л67 Електрорадіоматеріали.** Навчальний посібник / В.В. Лишук.  
– Луцьк, 2016. – 324 с.

У навчальному посібнику розглядаються фізичні процеси і явища, що протікають в електрорадіоматеріалах, а також пасивні та активні компоненти радіоелектронної апаратури, їх фізичні основи, принцип дії, параметри, характеристики, особливості застосування й основні напрями розвитку компонентної бази. Теоретичний матеріал супроводжується великою кількістю ілюстративного матеріалу та прикладами розв'язання задач.

Посібник розрахований для студентів ВНЗ, що навчаються за напрямами „Електроніка”, „Телекомунікації”, „Електронні пристрої та системи”, „Оптоелектроніка”, викладачів, аспірантів, інженерів.

Бібл.15 назв, іл.139.

ISBN 978-617-672-145-1

© В.В. Лишук, 2016

## Передмова

Стрімкий розвиток електроенергетики, радіотехніки і телекомунікацій відкриває людству нові невирішені завдання. Сучасна електро- та радіотехніка використовує в елементах конструкцій надзвичайно широкий спектр різноманітних електротехнічних матеріалів. Від їх властивостей і правильного вибору залежить ефективність роботи електроенергетичного та радіотехнічного обладнання. Тому актуальним завданням сьогодення є забезпечення систем електротехніки та телекомунікацій якісним обладнанням та розробка і впровадження нових, більш якісних матеріалів з кращими функціональними й експлуатаційними характеристиками.

При проектуванні та розробці нових електротехнічних та радіоелектронних пристроїв і обладнання з покращеними характеристиками знання електрофізичних, фізико-технічних та механічних властивостей використовуваних матеріалів є обов'язковою умовою раціонального вирішення цього завдання. Забезпечення високої надійності роботи електротехнічного обладнання ґрунтується насамперед на чітких уявленнях про процеси, що відбуваються в матеріалах протягом їх експлуатації, знаннях про методи профілактичного контролю та випробування електротехнічних виробів, вимогах діючих ДСТУ, нормативних та технічних умовах їх використання. Це є запорукою надійної роботи електричних і телекомунікаційних мереж.

Використання ізоляційних матеріалів з високими діелектричними властивостями, високою робочою температурою зменшує масогабаритні показники електротехнічних та радіоелектронних пристроїв, а значить дає змогу підвищувати їх ККД за рахунок зменшення втрат.

У наш час нові електрорадіоматеріали створюються в результаті як глибокого вивчення фізико-технічних характеристик, так і удосконалення технології виготовлення та широкого використання нових, раніше не застосовуваних в техніці видів сировини. Особливо важливим у вітчизняній електрорадіотехніці є удосконалення якості матеріалів, їх правильний вибір, є використання їх як провідників, діелектриків, напівпровідників або магнітних матеріалів. Тому для розуміння властивостей матеріалів потрібно досліджувати їх структуру і будову. Поєднання основних вимог з реальними можливостями виробництва забезпечить якість матеріалів, їх технологічність і високі параметри.

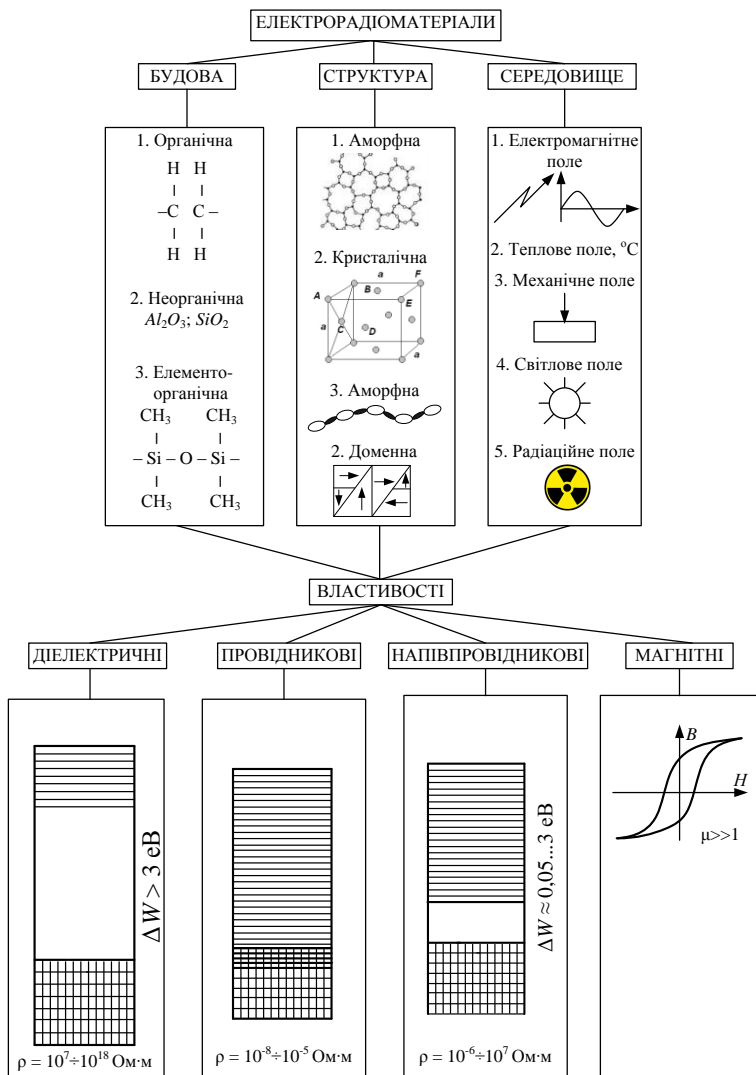


Рис.1.1. Структура дисципліни

Вивчення цього курсу дасть змогу фахівцям відповідних профілів правильно вибирати той чи інший матеріал для роботи в умовах впливу сильних електричних, магнітних і високочастотних полів, а також кліматичних факторів. Цим забезпечиться надійна робота електротехнічних пристроїв протягом тривалого часу без виникнення аварійних режимів.

# РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ

## 1.1. Будова речовини

Всі відомі речовини в природі складаються з елементарних частинок: протонів, нейтронів і електронів. З протонів і нейтронів складаються атомні ядра. У квантовій механіці рух електрона описується хвильовою функцією, що володіє в ізольованому атомі сферичною симетрією.

У речовинах об'єднання декількох атомів у молекулу досягається за рахунок електронів, що є загальними для всіх атомів. При цьому електронна оболонка між додатно зарядженими ядрами є найбільшою, що зв'язує їх в молекулу (ковалентний зв'язок).

Для оцінки електричних властивостей, а також гігроскопічності, адгезійних властивостей та інших дуже важливий поділ матеріалів на *полярні (дипольні)*, молекули яких завжди мають деякий, відмінний від нуля електричний момент і *неполярні (нейтральні)*, молекули яких здатні отримувати індукований електричний момент тільки під дією зовнішнього електричного поля (рис.1.2,а). Якщо центри додатніх і від'ємних зарядів в електричному полі співпадають з напрямом силових ліній, то молекули нейтральні. Якщо центри зарядів не співпадають і знаходяться на деякій відстані один від одного, то такі молекули є полярними або дипольними (рис.1.2,б).

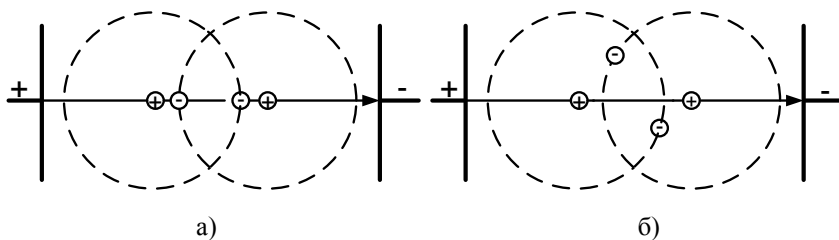


Рис.1.2. Ковалентний зв'язок: а) неполярний; б) полярний

За агрегатним станом електроізоляційні матеріали поділяються на тверді (найбільш чисельна група), рідкі і газоподібні. Особлива група – твердіючі матеріали, які у вихідному стані при введенні їх у виготовлювану ізоляцію, є рідинами, але потім твердіють і в готовій електричній ізоляції є твердими тілами (лаки, емалі, компаунди).

У радіоелектроніці використовують ще один стан речовини – плазму, що є повністю або частково іонізованим газом.

За хімічним складом електроізоляційні матеріали поділяються на органічні – з'єднання вуглецю з воднем, азотом, киснем і деякими іншими елементами, а також неорганічні.

Багато з органічних електроізоляційних матеріалів володіють цінними механічними властивостями – гнучкістю та еластичністю. З них можуть бути виготовлені волокна, плівки та вироби інших різноманітних форм, тому вони знайшли широке застосування в техніці. Однак такі матеріали, як правило, мають відносно низьку нагрівостійкість.

Неорганічні матеріали в більшості випадків не мають гнучких та еластичних властивостей. Вони є крихкими, що робить технологію їх обробки неможливою. Але неорганічні ізоляційні матеріали мають набагато вищу нагрівостійкість, а тому успішно застосовуються в тих електротехнічних установках, де необхідно забезпечити високу робочу температуру ізоляції.

Особлива група – елементоорганічні, в основу будови яких входять, крім вищезазначених елементів, елементи, які не входять до звичайних органічних речовин – це атоми кремнію  $Si$ , магнію  $Mg$ , алюмінію  $Al$ , титану  $Ti$  та інші. Як правило неорганічні матеріали мають більш високу нагрівостійкість, ніж органічні матеріали.

Важливий також поділ діелектриків на *гетерополярні* (іонні), молекули яких досить легко дисоціюють на іони і *гомеополярні*, для яких дисоціація на іони не характерна.

Розглянемо найважливіші види зв'язків, за рахунок яких відбувається об'єднання атомів у молекули.

*Ковалентний* зв'язок характеризується утворенням стійких електронних пар із електронів, що раніше належали окремим атомам. Ці пари стають спільними для атомів, що входять у склад молекул. Електрони при русі по молекулярній орбіті найчастіше знаходяться поміж ядрами, де створюється надлишок від'ємного заряду, що сприяє зближенню атомів. Якщо двохатомна молекула складається із атомів одного елемента (водень  $H_2$ , азот  $N_2$ , хлор  $Cl_2$ ), то електронна пара належить обом атомам. В цих випадках молекулу та існуючий в ній ковалентний зв'язок називають неполярними. Якщо двохатомна молекула складається з атомів різних елементів, то електронна пара може бути зміщена до одного з атомів. В таких випадках ковалентний зв'язок називається полярним, а молекули з

полярним зв'язком, в яких центри додатних і від'ємних зарядів не співпадають називаються полярними або дипольними.

Дипольна молекула характеризується величиною електричного дипольного моменту  $M$ :

$$M = q \cdot l \quad \text{Кл} \cdot \text{м} , \quad (1.1)$$

де  $q$  – величина заряду;  $l$  – віддаль між центрами додатного і від'ємного заряду. Наприклад, якщо заряд  $q \approx 2 \cdot 10^{-19}$  Кл, а відстань між молекулами прийняти  $l = (1 \div 3) \cdot 10^{-10}$  м, то дипольний момент молекули буде лежати в межах  $(2 \div 6) \cdot 10^{-29}$  Кл·м.

Багатоатомні молекули також можуть бути неполярними (при симетричному розташуванні), наприклад, поліетилен або полярними – при асиметричному розташуванні зарядів (наприклад, полівінілхлорид).

Речовини, що утворені молекулами з ковалентним зв'язком, характеризуються високою твердістю. Вони тугоплавкі і хімічно інертні, що пояснюється міцністю ковалентних зв'язків. Ковалентний зв'язок існує в молекулах алмазу, кремнію і деяких неорганічних сполуках.

*Донорно-акцепторний* зв'язок є різновидом ковалентного зв'язку. Він виникає між атомами елементів, один з яких здатний віддавати електрон (донор), а другий здатний приймати ці електрони (акцептор). Прикладом є арсенід галію ( $GaAs$ ), а також сполуки між елементами третьої і п'ятої групи періодичної системи Менделєєва.

*Іонний* зв'язок зумовлений силами електростатичного притягання між додатними і від'ємними іонами. Тверді тіла іонної структури характеризуються підвищеною механічною міцністю і відносно високою температурою плавлення. Сюди відносять колоїдні системи лужних металів. Іонні сполуки утворюють різні за властивостями матеріали – типові метали і типові неметали (хлористий цезій і титанат барію).

*Металічний* зв'язок між атомами (рис.1.3.) спостерігається в металах. Метали розглядаються як системи, побудовані з додатних іонів, що знаходяться у вузлах кристалічної решітки. Наявність вільних електронів призводить до високої електропровідності і теплопровідності і є також причиною блиску металу при зрізі. Ковкість металів пояснюється переміщенням і ковзанням окремих шарів іонів.

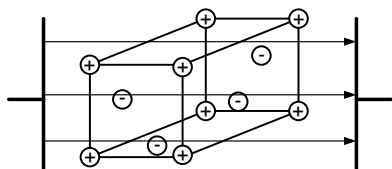


Рис. 1.3. Металічний зв'язок

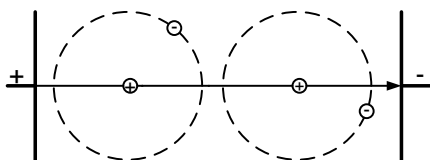


Рис. 1.4. Молекулярний зв'язок

*Молекулярний* зв'язок (зв'язок Ван-дер-Ваальса) (рис.1.4) існує в деяких речовинах між молекулами з ковалентними внутрімолекулярними зв'язками. Міжмолекулярне притягання в цьому випадку зумовлюється узгодженим рухом валентних електронів у сусідніх молекулах.

У будь-який момент часу електрони максимально віддалені один від одного і максимально наближені до позитивних зарядів. При цьому сили притягання валентних електронів додатньо зарядженими сусідніми молекулами є сильнішими сил взаємного відштовхування електронів зовнішніх орбіт. Такий вид зв'язку характерний для парафіну, що має низьку температуру плавлення із-за неміцності кристалічної решітки.

Більшість електротехнічних матеріалів є твердими тілами. Кожна речовина зазвичай утворює кристали строго визначених форм. Зовнішня форма кристалу відзеркалює його будову і зумовлена симетричним розміщенням атомів та молекул.

Розміщення атомів можна уявити у вигляді просторової кристалічної ґратки, що є сукупністю елементарних кристалічних комірок.

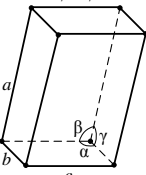
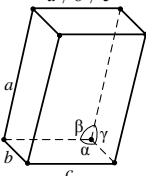
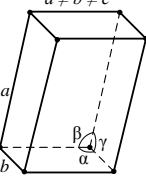
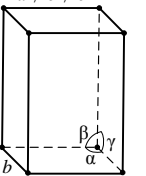
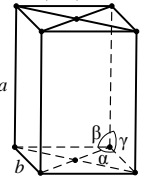
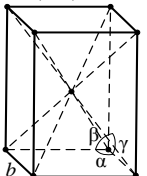
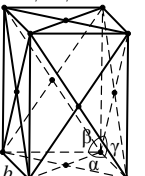
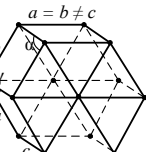
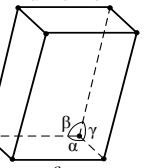
Геометрично можливі сім видів кристалічних систем, що містять 14 конфігурацій просторових ґраток (комірок) і показані в таблиці 1.1.

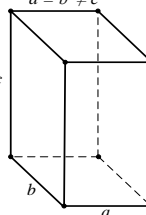
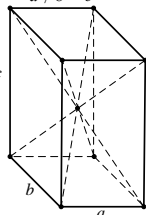
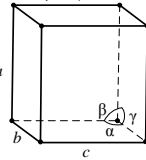
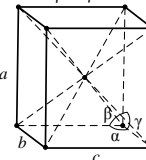
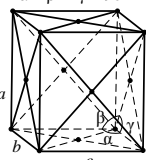
Триклінна кристалічна система характеризується найменшою просторовою симетрією, так як всі ребра елементарної комірки різні і кути між ребрами не є прямими. Кубічні кристали характеризуються просторовою симетрією, оскільки всі їх ребра однакові і кути між ними є прямими.

Інші кристалічні системи займають проміжне положення між триклінною і кубічною. Найбільш поширені різновиди кристалічних ґраток – це об'ємно концентрична, гранецентрована і гексагональна [8].



Табл.1.1

Кристалічна система	Просторові ґратки Браве			
Триклінна	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$ 			
Моноклінна	проста $\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$ 	базоцентрирована $\alpha, \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$ 		
Ромбічна	проста $a \neq b \neq c$ 	базоцентрирована $a \neq b \neq c$ 	об'ємноцентрирована $a \neq b \neq c$ 	гранецентрована $a \neq b \neq c$ 
Гексагональна	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ $a = b \neq c$ 			
Тригональна	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ $a = b = c$ 			

Кристалічна система	Просторові ґратки Браве		
Тетрагональна	проста $a = b \neq c$ 	об'ємноцентрована $a \neq b = c$ 	
Кубічна	проста $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 	об'ємноцентрована $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 	гранецентрована $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 

У залежності від виду частинок, що утворюють кристалічну ґратку, розрізняють атомні, іонні, металічні і молекулярні кристалічні ґратки.

У вузлах атомних ґраток знаходяться нейтральні атоми, зв'язані між собою ковалентним зв'язком. Такі кристалічні ґратки має алмаз та інші речовини, які характеризуються високою твердістю, дуже високими температурами плавлення і кипіння. Вони практично не розчиняються в жодних розчинниках, не проводять електричний струм, оскільки вільних електронів немає і всі вони беруть участь в утворенні ковалентних зв'язків. Атомні ґратки мають лише деякі речовини у твердому стані (силіцій  $Si$ , бор  $B$ , діоксид кремнію  $SiO_2$ , карбід кремнію  $SiC$  та ін.).

У вузлах молекулярних кристалічних ґраток містяться як неполярні молекули, так і полярні. Наприклад, у вузлах кристалічних ґраток йоду містяться молекули йоду  $I_2$ . Сили міжмолекулярної взаємодії, так звані сили Ван-дер-Ваальса, значно менші за сили ковалентного зв'язку. Тому речовини з молекулярними ґратками мають невелику твердість і є легкоплавкими. До таких речовин належать, наприклад, йод  $I$ , нафталін  $C_{10}H_8$ , бром  $Br$ , вода  $H_2O$ , спирт  $C_2H_5OH$ , хлор  $Cl$ , амоніак  $NH_3$ , метан  $CH_4$ .

Типовим представником сполук з *іонним типом кристалічних ґраток* є хлорид натрію  $NaCl$ . Його кристалічні ґратки утворені іонами натрію та іонами хлору, які по чергово розміщуються у вузлах ґраток. Оскільки у кристалі сили притягання поширюються однаково в усіх напрямках, іони натрію і хлору сполучаються дуже міцно, хоча кожний із них не зафіксований нерухомо. Іони безперервно здійснюють теплові коливання навколо свого положення в ґратках. Міцність іонних кристалів залежить також і від заряду та радіуса іонів. Однак їх поступальний рух уздовж ґраток не відбувається, тому всі речовини з іонним зв'язком – тверді (кристалічні), з досить високою температурою плавлення і ще вищою – кипіння. Подібно до хлориду натрію майже всі солі, основні оксиди, гідроксиди складаються не з молекул, а з іонів.

*Металічні ґратки* – кристалічні речовини, всі атоми яких об'єднані металічними зв'язками. Валентні електрони металу при цьому делокалізовані по всьому простору кристалічної ґратки, утвореної його позитивно зарядженими іонами. Металічні кристали характеризуються високими електро- і теплопровідністю, блиском, пластичністю й ковкістю. Існують речовини, кристалічні ґратки яких можна розглядати як проміжні. Наприклад, у графіту, який має шарувату гексагональну структуру, атоми карбону у межах одного шару утворюють три ковалентні зв'язки з трьома іншими атомами. Четвертий зв'язок атомів делокалізований у межах усього кристалу. Вуглецеві шари об'єднуються в кристалічну ґратку за рахунок міжмолекулярних сил.

Зв'язок будови і властивостей речовин показаний в таблиці 1.2.

Табл.1.2.

ґратки	Атомні	Іонні	Молекулярні	Металічні
Хімічний зв'язок	Ковалентний	Іонний	Міжмолекулярний	Металічний
Міцність зв'язку	Висока	Висока	Низька	Висока
Температура плавлення	Висока	Висока	Низька	Висока
Електропровідність	Діелектрик, напівпровідник	Діелектрик	Діелектрик	Провідник
Механічні властивості	Висока твердість	Твердість, крихкість	Крихкість	Твердість, пластичність

Міцність зв'язків у площині значно більша, ніж між шарами. Тому ґратку графіту можна розглядати і як атомну, і як металічну, що пояснює електропровідність графіту, його м'якість і металічний блиск.

*Аморфні речовини.* Внутрішня будова аморфних речовин характеризується хаотичним розміщенням атомів і молекул, тобто в них відсутня кристалічна будова. Вони поділяються на дві великі групи – прості аморфні речовини (низькомолекулярні рідини, неорганічне скло, кварц) та високомолекулярні з'єднання (каучук, гума, органічне скло, смола). Твердий стан аморфних речовин – скло. Аморфні речовини можуть перебувати або у склоподібному стані (при низьких температурах), або в стані розплаву (при високих температурах). Властивості аморфних тіл не залежать від вибраного напрямку, тобто аморфні тіла ізотропні. Вони не мають визначеної температури плавлення і характеризуються досить широким температурним інтервалом розм'якшення. В'язкість аморфних матеріалів – неперервна функція температури: чим вища температура, тим нижча в'язкість аморфної речовини.

*Анізотропія кристалів.* У полікристалічних тілах, що складаються з великої кількості кристалів, анізотропія в більшості випадків не спостерігається, однак з допомогою спеціальної обробки можуть бути отримані текстуровані матеріали з орієнтованим розміщенням кристалів.

Так як монокристали анізотропні, то при визначенні електричних, механічних та інших властивостей необхідно вказувати розміщення кристалографічних площин і напрямів в кристалах. Для цього використовують *індекси Міллера*.

У кубічних кристалах індекси (100) відносяться до площини, паралельної осям  $Y$  і  $Z$ ; індекси (010) – до площини, паралельної осям  $X$  і  $Z$ , а (001) – до площини, паралельної осям  $X$  і  $Y$ . У кристалах з ортогональними осями ці площини разом з тим перпендикулярні відповідно до осей  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ .

Для визначення напрямів у кристалі застосовують індекси у вигляді найменших цілих чисел, що відносяться між собою як компоненти вектора, що паралельний даному напрямку. На відміну від позначення площин їх записують у квадратних дужках. В кубічних кристалах ці напрямки перпендикулярні площині з тими ж індексами. Додатній напрям осі  $X$  позначають [100], додатній напрям осі  $Y$  – [010], осі  $Z$  – [001], діагональ куба – [111] і т.д. Позначення кристалографічних площин і напрямів приведені на рис.1.5.

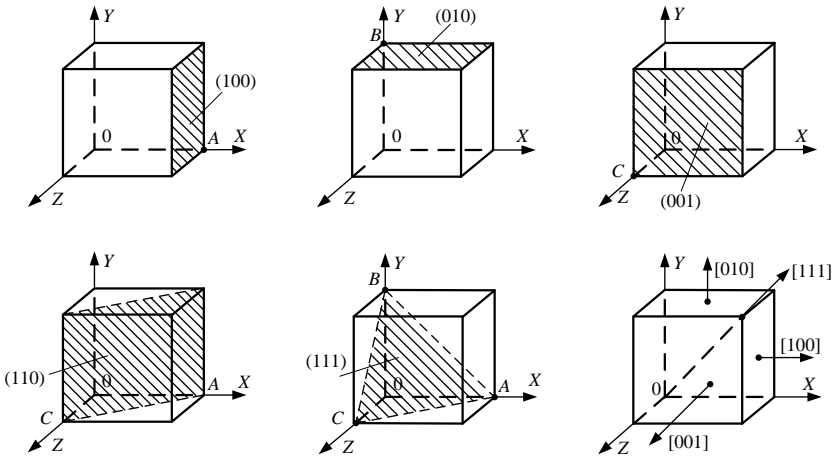


Рис. 1.5. Приклади позначення кристалографічних площин і напрямів у кубічних кристалах з допомогою індексів Міллера

Якщо кристалічне тіло складається з одного великого кристалу, тобто є монокристалічним, то воно характеризується анізотропією властивостей. Ступінь анізотропії може бути значною. Дослідження монокристаллу міді в різних напрямках показали, що межа міцності на розтяг змінюється від 120 до 360 МПа, а відносне видовження перед розривом  $\Delta l / l$  складає від 10 до 55%.

Анізотропія монокристалів має важливе значення для напівпровідникової техніки. Вона проявляється тим сильніше, чим менша ступінь симетрії їх кристалічної ґратки.

*Процеси кристалізації.* Будь-яка речовина може перебувати в трьох агрегатних станах – газоподібному, рідкому і твердому. Зміна агрегатного стану відбувається за певних температур і тисків.

Всі кристалічні тіла при нагріві зберігають твердий стан до визначеної температури. Атоми у вузлах кристалічної решітки неперервно коливаються. Чим більша температура тіла, тим більша амплітуда цих коливань. При досягненні деякої критичної температури амплітуда коливань різко збільшується і відбувається руйнування кристалічної решітки, тобто атоми розміщуються хаотично, в результаті чого тіла з твердого стану переходять в рідкий. Температуру, при якій тіло переходить з твердого стану в рідкий, називають температурою плавлення  $\Theta_{пл}$ .

На відміну від кристалічних тіл аморфні не мають строго визначеної температури переходу з рідкого стану в рідкий. Цей перехід

здійснюється в широкому діапазоні температур. Перехід речовини з рідкого стану в твердий з утворенням кристалічної структури називається первинною кристалізацією при температурі кристалізації.

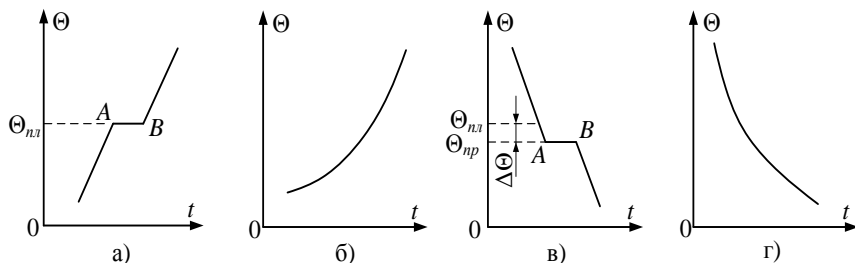


Рис. 1.6. Криві нагріву кристалічної (а) і аморфної (б) речовин, криві охолодження кристалічної (в) і аморфної (г) речовин

Для визначення температури кристалізації застосовують термічний метод. З допомогою термомпари через визначені проміжки часу фіксують температуру охолоджуючої рідини. В координатах «температура-час» будують криву охолодження. Поки речовина знаходиться в рідкому стані, температура понижується рівномірно до точки A. Щоб отримати кристалізацію, речовину потрібно охолодити до температури охолодження  $\Theta_{пр}$ , тобто її температура повинна бути дещо нижчою температури плавлення  $\Theta_{нл}$ . Цю різницю називають ступенем переохолодження  $\Delta\Theta$ . В точці A при температурі  $\Theta_{пр}$  в розплаві виникають перші центри кристалізації, число яких збільшується в міру відведення тепла. При цьому кристали збільшуються за рахунок приєднання нових атомів розплаву. До тих пір, поки вся рідина не затвердіє (точка B), температура розплаву залишається постійною, так як процес кристалізації супроводжується виділенням теплоти. Після затвердіння речовини спостерігається плавне пониження її температури.

Ступінь переохолодження визначає число центрів кристалізації і швидкість росту кристалів. Якщо ступінь переохолодження невелика, то кількість центрів кристалізації відносно мала, а швидкість росту кристалів велика. Тому в результаті повільного охолодження отримується крупнозерниста кристалічна структура. При великому ступені переохолодження утворюється велике число центрів кристалізації, а швидкість їх росту невелика. Відповідно при швидкому охолодженні отримується дрібнозерниста структура. Таким чином, змінюючи умови охолодження речовини, можна змінювати його кристалічну структуру, а відповідно властивості твердого тіла.

*Структурні дефекти твердих тіл.* Реальні кристали завжди містять дефекти кристалічної структури. Дефекти у кристалах утворюються уже в процесі вирощування монокристалу речовини. Їх концентрація різко збільшується із збільшенням температури, а також при деформації кристалу. Розрізняють два основних види дефектів кристалічної ґратки [8].

*Точкові дефекти* створюються при внесенні у вузли і міжвузлові ділянки ідеальної кристалічної ґратки «чужорідних» атомів, наприклад, при приготуванні сплаву (рис.1.7, а,б). Крім цього, до точкових дефектів відносять вакансії, тобто незаповнені атомами основного матеріалу вузли кристалічної ґратки. При цьому атом основного матеріалу може знаходитись поряд, між вузлами кристалічної ґратки (дефекти за Френкелем, рис.1.7, в). Можливі випадки, коли атом може зовсім випаруватись з об'єму матеріалу і є вакансія (дефекти за Шотткі, рис.1.7, г).

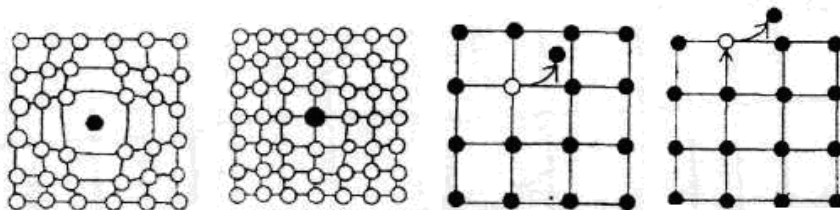


Рис.1.7. Умовне позначення точкових дефектів кристалічної ґратки:  
а) дефекти типу внесення; б) дефекти типу заміщення;  
в) дефекти за Френкелем; г) дефекти за Шотткі

Точкові дефекти кристалічної ґратки можуть утворюватись при бомбардуванні поверхні кристалу прискореними зарядженими іонами різних речовин. Дефекти такого походження називають *радіаційними дефектами*.

*Дислокація* – це лінійний дефект, що полягає у зміщенні площин кристалічної ґратки одна відносно іншої. Розрізняють два основних типи дислокацій:

- *лінійна дислокація* є результатом неповного зсуву кристалічної ґратки. В результаті з'являється незакінчена площина атомів (рис.1.8,а);

- *гвинтова дислокація* виникає внаслідок повного зсуву деякої ділянки ґратки (рис.1.8,б).

Виходи дислокацій на поверхню кристалу можна виявити за результатами травлення кристалу у спеціальному протравлювачі. В результаті травлення на поверхні кристалу з'являються ямки трав-

лення, добре помітні під мікроскопом. Густина дислокацій оцінюють. Наприклад, кристал напівпровідникового матеріалу придатний до подальшого використання, якщо густина дислокацій в ньому не перевищує  $10^6 \div 10^7 \text{ м}^{-2}$ .

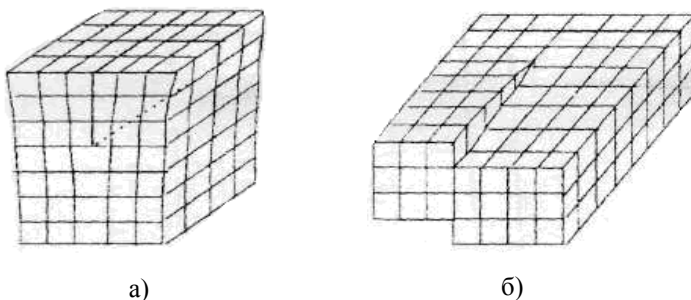


Рис. 1.8. Умовне позначення лінійних дефектів кристалічної ґратки:  
а – лінійна дислокація; б – гвинтова дислокація

Хоч відносна концентрація атомних дефектів може бути невеликою, але зміни фізичних властивостей кристалу можуть бути суттєвими. Наприклад, тисячні долі атомного проценту деяких домішок можуть змінювати електричний опір чистих напівпровідникових кристалів в  $10^5 \div 10^6$  разів.

*Поліморфізм.* Деякі тверді речовини володіють здатністю утворювати не одну, а дві і більше кристалічних структури, стійких до різних температур і тисків. Таку властивість матеріалів називають поліморфізмом, а кристалічні структури, що відповідають їм називають *поліморфними формами* або *алотропними модифікаціями речовини*. Модифікацію, стійку при нормальній і більш низькій температурі, прийнято позначати буквою  $\alpha$ , а модифікації, стійкі при більш високих температурах, позначають відповідно буквами  $\beta$ ,  $\gamma$ .

Поліморфізм широко розповсюджений серед технічних матеріалів і має важливе значення для їх обробки та експлуатації. Класичним прикладом поліморфізму є низькотемпературне перетворення білого олова ( $\beta\text{-Sn}$ ) в сіре ( $\alpha\text{-Sn}$ ).

Практичний інтерес має поліморфізм вуглецю. Він зустрічається у вигляді алмазу або графіту. У звичайних умовах графіт є більш стійкою модифікацією, ніж алмаз. Однак при підвищенні тиску стійкість алмазу зростає, а графіту зменшується і при досить високих тисках алмаз стає більш стійким. Якщо при цьому підвищити температуру аж до збільшення рухливості атомів, то графіт можна перевести в алмаз.



## 1.2. Класифікація електрорадіоматеріалів

Всі речовини залежно від їх електричних властивостей відносять до діелектриків, провідників або напівпровідників. Відмінність між провідниками, напівпровідниками і діелектриками наочно можна показати за допомогою енергетичних діаграм зонної теорії твердих тіл [3].

Дослідження спектрів випромінювання різних речовин в газоподібному стані, коли атоми розташовані один від одного на великих відстанях, показує, що для атомів кожної речовини характерні цілком певні спектральні лінії. Це говорить про наявність певних енергетичних станів (рівнів) для різних атомів.

Частина цих рівнів заповнена електронами в нормальному, не збудженому стані атома. На інших рівнях електрони можуть знаходитися тільки після того, як атом піддає зовнішній енергетичній дії, при цьому він стає збудженим. Намагаючись прийняти стійкий стан, атом випромінює надлишок енергії у момент повернення електронів на рівні, при яких енергія атома мінімальна.

Енергетична діаграма матеріалів, приведена на рис.1.9. Під час переходу газоподібної речовини в рідину, а потім утворення кристалічної ґратки завдяки зближенню однакових атомів проявляється взаємодія атомів між собою, в результаті якої енергетичні рівні електронів ізольованих атомів утворюють енергетичні зони. Вони, подібно до енергетичних рівнів електрона в ізольованому атомі, розділені шириною забороненої зони  $\Delta W$ .

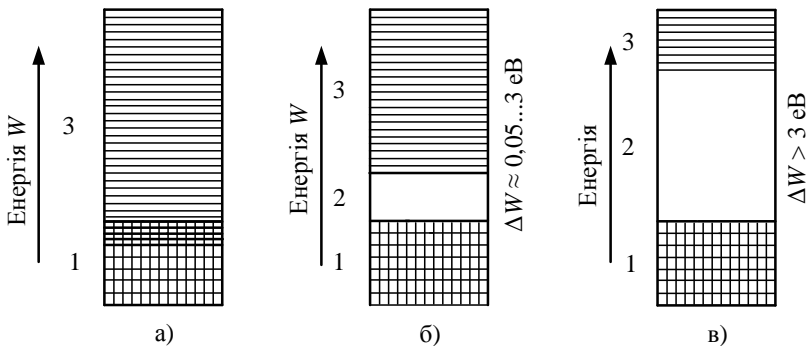


Рис.1.9. Енергетичні діаграми при  $T \rightarrow 0$  К для провідників (а), напівпровідників (б), діелектриків (в); 1 – валентна зона, 2 – заборонена зона, 3 – зона провідності

Енергія кристала буде мінімальною (стійкий стан), коли нижні зони будуть зайняті електронами, а верхні будуть вільними. Верхню заповнену зону називають валентною, а найнижчу з вільних зон – зоною провідності.

**Електрорадіоматеріалами** називаються матеріали, що характеризуються певними властивостями по відношенню до електромагнітного поля і застосовуються в електро- і радіотехніці з урахуванням цих властивостей.

За дією на матеріал електричного та магнітного полів всі матеріали поділяються на діелектричні, провідникові, напівпровідникові і магнітні.

**Діелектриками** називаються матеріали основною властивістю яких є здатність до поляризації і в яких можливе існування електростатичного поля. Вони використовуються в різних електротехнічних пристроях для утворення електричної ізоляції, тобто запобігання витоків електричних зарядів.

Діелектрики розділюють електричні кола одне від одного або струмопровідні частини від провідникових частин (металеві корпуси, заземлення тощо). В конденсаторах діелектричні матеріали служать для утворення деякого значення ємності.

Реальний технічний діелектрик тим більше наближається до ідеального, чим менша його питома електропровідність, і чим слабше виражені в нього сповільнені механізми поляризації, пов'язані з розсіюванням електричної енергії і виділенням тепла. Питомий електричний опір діелектриків лежить в межах  $10^9 \div 10^{20}$  Ом·см.

Діелектрики поділяють на газоподібні, рідкі і тверді, які можуть бути природними і синтетичними, а також неорганічними і органічними. За розмірами молекул поділяються на низькомолекулярні та високомолекулярні, за формою молекул – на термопластичні і термореактивні, за електричними властивостями класифікуються на полярні і неполярні.

**Провідникові** матеріали – це матеріали, в яких сильно виражена у порівнянні з іншими матеріалами електропровідність та теплопровідність при нормальних температурах. У провідників валентна зона впритул прилягає до зони провідності або навіть перекривається нею. Внаслідок цього електрони в металі можуть переходити з рівнів заповненої зони на незайняті рівні вільної зони навіть під впливом слабких напруженостей прикладеного до провідника електричного поля.

Питомий електричний опір провідників лежить в межах  $10^{-6}$ ÷ $10^{-3}$  Ом·см. Провідники можуть бути класичними, кріопровідниками і надпровідниками, в яких система кристалічної ґратки складається з вузлів з додатнім іоном, що знаходяться в середовищі вільних електронів і які визначають високу електропровідність і теплопровідність провідників.

До провідникових матеріалів відносять матеріали високої провідності, з яких виготовляють струмопровідні частини електричних машин і апаратів, обмотки, контакти, проводи і кабелі та сплави високого опору для виготовлення резисторів, електронагрівальних пристроїв, реостатів, терморпар тощо.

**Напівпровідникові** матеріали – це ті матеріали, які за своєю питомою провідністю є проміжними між провідниками і діелектриками, відмінною особливістю яких є сильна залежність питомої провідності від концентрації і виду домішок або інших дефектів, а також від зовнішніх енергетичних впливів (температура, освітленість, електричне поле, деформації, радіаційне поле і т.д.).

Питомий електричний опір напівпровідників лежить в межах  $10^{-4}$ ÷ $10^9$  Ом·см. Класифікуються на хімічні елементи (прості) і хімічні з'єднання (складні), причому останні за кількістю складових можуть бути: двоелементними (бінарні) і багатоелементними; за типом електропровідності: типу *n* – електронна електропровідність, типу *p* – діркова електропровідність; органічні і неорганічні, а за характером електропровідності – електронні та іонні; за структурою – кристалічні та аморфні.

До напівпровідників належать такі основні матеріали: кремній, германій, селен, телур, сірка та інші.

**Магнітні** матеріали за своїми властивостями поділяються на сильномагнітні: феромагніти і феримагніти (магнітотверді та магнітом'які) і слабомагнітні: парамагнетики і діамагнетики. Переважна більшість електрорадіоматеріалів є немагнітними. Проте серед магнітних матеріалів розрізняють провідникові, напівпровідникові і діелектрики. Від цього залежить частотний діапазон їх застосування.

До магнітних матеріалів відносять залізо, нікель, кобальт і їхні сплави, сплави хрому і марганцю, гадоліній, ферити, різні сполуки. Магнітні матеріали застосовуються для виготовлення осердь трансформаторів, магнітних систем електричних машин, в апаратах, приладах тощо.

*Активні діелектрики* (керовані) відрізняються від звичайних тим, що беруть активну участь в роботі електричної схеми: у відповідних компонентах служать для генерації, підсилення, модуляції, перетворення електричних сигналів. До них відносять сегнето-п'єзо- та піроелектрики, електрети та ін.

Раніше питання використання електрорадіоматеріалів було досить простим. Широко використовувались в електроізоляційній техніці матеріали природного походження: деревина, бавовняно-паперове волокно, шовк, рослинні оливи, натуральний каучук, природні смоли, кам'яні породи і т.д.

За останні роки, умови в яких працює електротехнічна апаратура стали значно складнішими. Піднялись робочі напруги електротехнічних пристроїв, зросли їх одиничні потужності за рахунок підвищення напруги з одного боку і також за рахунок збільшення їх габаритів.

З іншого боку навпаки, повинні бути малі габарити радіоелектронних пристроїв. Тут потрібно вирішувати інші завдання. Так, для мініатюрних пристроїв потрібні матеріали з малими діелектричними втратами. Крім того, доводиться мати справу з високими і надвисокими частотами.

Досить часто з ізоляційними матеріалами доводиться працювати в умовах підвищеної вологості, дії хімічного середовища, проникаючого випромінювання, механічних зусиль, низьких температур. Одночасно з тим, як погіршуються умови експлуатації апаратів, підвищуються вимоги до надійної роботи електротехнічних пристроїв, що забезпечується в першу чергу надійністю їх електричної ізоляції, контактних з'єднань, напівпровідникових і діелектрично-активних елементів схеми.

З цього випливає необхідність всестороннього дослідження властивостей нових матеріалів, по яких ще не зібраний достатній досвід експлуатації.

Для того, щоб добре розібратися у вимогах, які виставляються до електрорадіоматеріалів потрібно вивчати фізичні явища, які в них відбуваються при дії на них електромагнітного поля і встановити параметри та залежності, що кількісно визначають властивості матеріалів. Як правило, всі нові, що мають високі властивості електрорадіоматеріали, мають синтетичне (штучне) походження.

Велике значення мають синтетичні високомолекулярні сполуки (органічні та елементоорганічні полімери), а також неорганічні матеріали такі як скло, керамічні і склокерамічні матеріали, а також вирощені монокристали різноманітних речовин.

За останні роки відкриті нові види діелектричних, провідникових, напівпровідникових, магнітних матеріалів, що мають особливі властивості. Цілий ряд наукових інститутів займається проектуванням і виготовленням матеріалів з новими, наперед заданими властивостями, для подальшого використання у принципово нових технічних винаходах.

Так, наприклад, можна говорити про такі винаходи, як лазерна техніка, використання якої стало можливим завдяки вирощуванню монокристалів рубіну з дуже високим ступенем паралельності, апаратура голографії для захисту цінних паперів і багато інших. Для виготовлення електротехнічних матеріалів використовують різноманітні, іноді дуже складні технологічні процеси – виготовлення синтетичних матеріалів, вакуумне напилення напівпровідникових матеріалів на різні основи (мікросхеми), способи глибокої очистки матеріалів. Наприклад, зонна плавка матеріалів і сплавів, рафінування металів способом електролізу.

### **1.3. Фізична суть провідності діелектриків**

За своїм призначенням електроізоляційні матеріали не повинні пропускати електричний струм під дією прикладеної електричної напруги, тобто вони мають бути непровідниками. Проте, як показує досвід, ідеальних ізоляторів не існує і всі вони пропускають незначний струм.

*Електропровідність* діелектриків пояснюється наявністю в них вільних заряджених частинок (іонів, моліонів та електронів). Поляризаційні процеси зміщення зв'язаних зарядів в речовині до моменту встановлення рівноважного стану протікають в часі, утворюючи струми зміщення в діелектрику. Струми зміщення настільки короткочасні, що їх не можна зафіксувати приладами. Їх називають абсорбційними струмами.

При постійній напрузі абсорбційні струми, змінюючи свій напрям, протікають тільки в моменти ввімкнення і вимкнення напруги. При змінній напрузі вони протікають протягом всього часу знаходження матеріалу в електричному полі.

Наявність в технічних діелектриках невеликої кількості вільних зарядів призводить до виникнення слабких наскрізних струмів. Струм витікання в технічному діелектрику є сумою наскрізного струму і струму абсорбції:

$$I = I_{ск} + I_{аб}. \quad (1.2)$$

Як видно з рис.1.10. після завершення процесів поляризації через діелектрик протікає тільки наскрізний струм.

Для діелектриків найбільш характерна *іонна електропровідність*. Вона виникає в матеріалах завдяки присутності практично немінучих забруднень – домішок води, солей, кислот, лугів.

У деяких випадках дії електролізу піддається основна речовина під час проходження через неї струму. Прикладом може бути звичайне скло, в якому завдяки його прозорості можна спостерігати

утворення і перенесення продуктів електролізу (ріст дендритних кристалів із атомів металу, що входять до складу скла – *Na, Fe*).

*Молекулярна електропровідність* за своєю фізичною суттю близька до іонної. Цей вид електропровідності спостерігається в колоїдних системах, що є тісною сумішшю двох фаз, з яких одна фаза у вигляді дрібних частинок рівномірно розподілена в другій – дисперсному середовищі.

З колоїдних систем у техніці найчастіше зустрічаються емульсії (обидві фази є рідинами) і суспензії – тверда речовина і рідина.

В *електронній електропровідності* носіями заряду є вільні електрони. Такі складні сполуки як *TiO<sub>2</sub>; BaTiO<sub>3</sub>; BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>; CaTiO<sub>3</sub>; SrTiO<sub>3</sub>* проявляють електронний характер провідності.

Струм, що проходить через ділянку ізоляції або через зразок електроізоляційного матеріалу при встановленому процесі провідності після прикладання постійного струму називається наскрізним струмом витікання і дорівнює сумі об'ємного і поверхневого струмів.

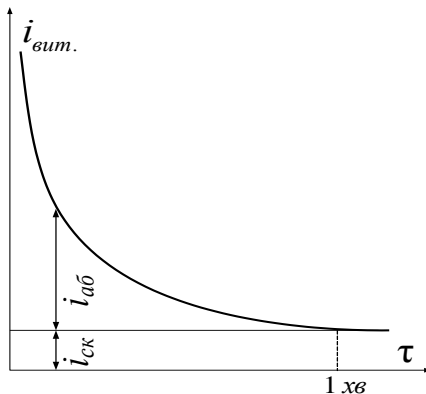


Рис.1.10. Залежність струму витікання

$$I_{iz} = I_V + I_S. \quad (1.3)$$

Для твердих діелектриків розрізняють об'ємну провідність ізоляції  $G_V$  і поверхневу провідність  $G_S$  (рис.1.11).

Об'ємна провідність при низьких температурах зумовлена рухом слабозакріплених іонів. При підвищених температурах провідність зумовлена переносом іонів основної речовини діелектрика, що звільнилися з вузлів кристалічної решітки. У гігроскопічних матеріалах (тканини, пориста кераміка) об'ємна провідність збільшується у вологому повітрі за рахунок поглинання вологи, яке проходить тим сильніше, чим більша відносна вологість повітря.

Поверхнева електропровідність діелектрика на практиці залежить від стану його поверхні, а саме ступеня її зволоження і забруднення. Найменшим значенням питомої поверхневої провідності володіють неполярні діелектрики, поверхня яких не змочується водою. Полярні діелектрики характеризуються більш високими значеннями питомої поверхневої провідності. Для зменшення поверхневої провідності електроізоляційних матеріалів їх покривають вологостійкими, які не змочуються водою, речовинами, наприклад, кремній-органічними лаками.

У відповідності з поняттями провідностей введемо поняття об'ємного і поверхневого опорів, оскільки опір – величина, обернена до провідності,  $R = 1/G$ .

Об'ємний опір розраховують за формулою:

$$R_V = \rho_V \cdot \frac{h}{S}, \quad (1.4)$$

де  $\rho_V$  – питомий об'ємний опір, Ом·м;  $S$  – площа електрода, м<sup>2</sup>;  $h$  – товщина зразка, м.

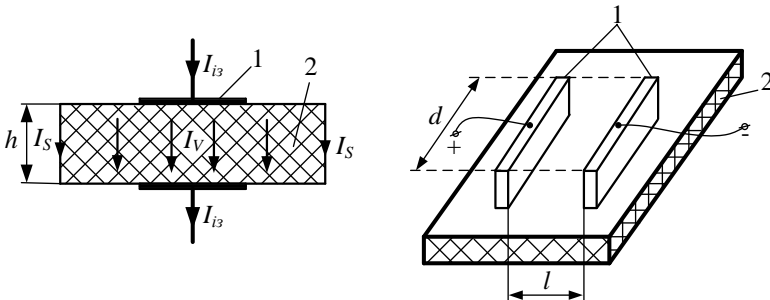


Рис.1.11. До визначення об'ємного та поверхневого опорів діелектрика

Поверхневий опір:

$$R_s = \rho_s \cdot \frac{l}{d}, \quad (1.5)$$

де  $\rho_s$  – питомий поверхневий опір матеріалу, Ом;  $d$  – ширина електродів, м;  $l$  – віддаль між електродами, м.

Повний опір ізоляції твердого діелектрика визначають, як опір паралельного ввімкнення цих двох опорів:

$$R_{iz} = \frac{R_V \cdot R_s}{R_V + R_s}. \quad (1.6)$$

Тоді струм, що проходить через ділянку ізоляції визначається згідно закону Ома:

$$I_{iz} = \frac{U}{R_{iz}}. \quad (1.7)$$

Величина питомого об'ємного опору  $\rho_V$  становить:

– для чистих, однокомпозиційних, однорідних матеріалів (кристали, полімери та подібні їм діелектрики)  $\rho_V < 10^{15} \div 10^{13}$  Ом·м;

– для технічних діелектриків, для яких характерна релаксаційна поляризація  $\rho_V < 10^{13} \div 10^{10}$  Ом·м;

– для складних діелектриків, композиційних і шарових матеріалів  $\rho_V < 10^{10}$  Ом·м.

Питомий поверхневий опір  $\rho_s$  визначається адгезією матеріалу до вологи, урахуванням забруднення і шерехуватості його поверхні:

– для діелектриків з незмочуваною поверхнею, нерозчинною або такою, що не вбирає у себе вологу  $\rho_s < 10^{13} \div 10^{11}$  Ом;

– для діелектриків, що частково вбирають у себе вологу, а також з непровідним забрудненням  $\rho_s < 10^{11} \div 10^{10}$  Ом;

– для діелектриків, що поглинають у себе вологу і розчинюють її  $\rho_s < 10^9$  Ом.

Часто при розрахунку ізоляції використовують приведену довжину діелектрика:  $\Lambda = \frac{S}{h}$ .

Розглянемо ділянку ізоляції між електродами, що мають вид коаксіальних циліндрів (рис.1.12.) з осьовою довжиною  $l$ , м, діаметром внутрішнього електрода  $d_1$  (радіус  $r_1$ ) і діаметром зовнішнього електрода  $d_2$  (радіус  $r_2$ ), тобто циліндричний конденсатор.



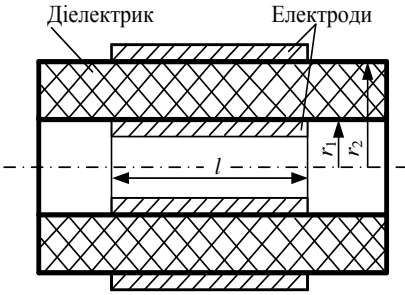


Рис.1.12. Циліндрична ділянка ізоляції

Приведена довжина для циліндричної ділянки ізоляції:

$$\Lambda = \frac{2\pi l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (1.8)$$

Для цього випадку:

$$R = \frac{\rho_V}{2\pi l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (1.9)$$

Якщо  $r_2 - r_1 \ll r_1$ , тоді:

$$R = \frac{\rho_V (d_2 - d_1)}{\pi l (d_2 + d_1)} = \frac{\rho_V (r_2 - r_1)}{\pi l (r_2 + r_1)}, \quad (1.10)$$

або

$$\Lambda = \pi l \cdot \frac{d_2 + d_1}{d_2 - d_1} = \pi l \cdot \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}. \quad (1.11)$$

Формули (1.4), (1.9), (1.10) справедливі тільки в тому випадку, якщо знехтувати розтіканням ліній струму від країв електродів в частину об'єму ізоляції, що не охоплюється електродами.

Питомий поверхневий опір  $\rho_S$  характеризує властивість електроізоляційного матеріалу створювати на поверхні поверхневий опір.

Для плоских електродів (рис.1.13,а):

$$R_S = \rho_S \cdot \frac{a}{b}. \quad (1.12)$$

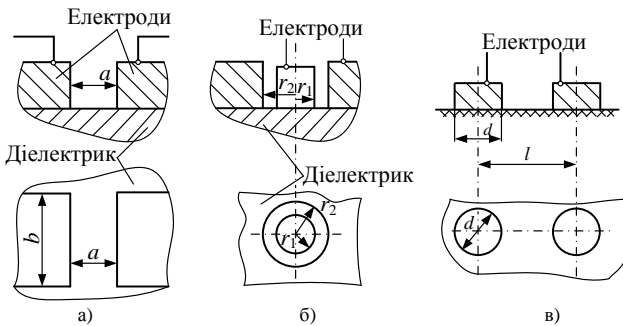


Рис.1.13. Визначення поверхневого опору між плоскими електродами (а), між концентричними електродами (б), між дисковими електродами (в)

Поверхневий опір кільцевого проміжку дорівнює (рис.1.13,б):

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (1.13)$$

Якщо  $d_2 - d_1 \ll d_1$ , то:

$$R_s = \frac{\rho_s (d_2 - d_1)}{\pi(d_2 + d_1)} = \frac{\rho_s (r_2 - r_1)}{\pi(r_2 + r_1)}. \quad (1.14)$$

Поверхневий опір між двома дисковими електродами, що мають діаметр  $d$  і віддаль  $l$  (рис.1.13,в):

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left( \frac{l}{d} + \sqrt{\left(\frac{l}{d}\right)^2 - 1} \right). \quad (1.15)$$

Якщо  $d \ll l$ , тоді приблизно:

$$R_s \approx \frac{2\rho_s}{\pi} \cdot \frac{2l-d}{2l+d} = \frac{2\rho_s}{\pi} \cdot \frac{l-r}{l+r}. \quad (1.16)$$

Ці формули справедливі, якщо знехтувати впливом країв електродів (при  $a \ll b$ ). Тут також слід мати на увазі, що об'ємний струм через матеріал між електродами не враховується.

Гази при невеликих напруженостях електричного поля володіють дуже малою електропровідністю. Струм у газах може виникати тільки при наявності в них іонів або вільних електронів. Іонізація молекул газу виникає з двох причин: або внаслідок будь-яких зовнішніх факторів, або внаслідок співударів заряджених частинок (вільних електронів) газу з нейтральними молекулами.

У багатьох випадках, особливо у розріджених газах, можлива поява електропровідності за рахунок іонів, утворених в результаті співударів заряджених частинок з молекулами газу. Така іонізація називається ударною. У слабких полях ударної іонізації немає і відповідно самостійна електропровідність відсутня.

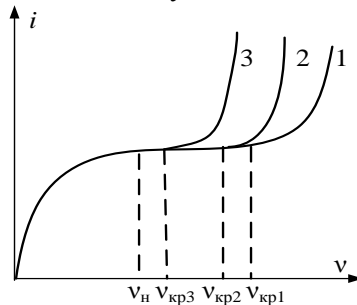


Рис.1.14. Електропровідність газу 1, рідини 2 і твердого діелектрика 3

На кривій 1 рис.1.14 розрізняють: до  $v_n$  несамостійну іонізацію, коли зі збільшенням концентрації заряду  $v$  спостерігається збільшення струму  $I$  до його насичення  $v_n$ . Тут зовнішнє електричне поле змінює величину струму (на лінійній ділянці за законом Ома, на нелінійній – не виконується). Потім виділяється область насичення струму (від  $v_n$  до  $v_{кр1}$ ), коли явище рекомбінації призводить до збільшення струму, хоча концентрація зарядів зростає (широка ділянка цієї кривої характерна для газів, тобто для матеріалів, у яких мала кількість домішок). Ділянка кривої 1 за межами  $v_{кр1}$  – це самостійний процес іонізації, коли зовнішні фактори (ультрафіолетові промені, рентгенівське випромінювання і світловий тиск) суттєво підвищують електропровідність газу.

Електропровідність *рідин* пов'язана з будовою їх молекул (крива 2). У неполярних рідинах електропровідність залежить від вмісту дисоційованих домішок, в тому числі і від води. У полярних рідинах електропровідність визначається не тільки домішками, але й дисоціацією молекул власне рідини (крива 2, ділянка від  $v_n$  до  $v_{кр2}$ ). Неможливість повного видалення з рідких діелектриків домішок, здатних до дисоціації, ускладнює отримання високоякісних електроізоляційних рідин з малою питомою електропровідністю. Найбільш точною для визначення питомої електропровідності при зміні температури є формула:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\alpha t}, \quad (1.17)$$

де  $\gamma_0$ ,  $\alpha$  – константи для заданої рідини;  $t$  – температура, °С.

У табл.1.3 наведені значення питомого об'ємного опору і діелектричної проникності деяких рідин при температурі 20 °С.

Таблиця 1.3

Рідина	Особливості будови	Питомий опір $\rho$ , Ом·м	Діелектрична проникність $\epsilon$
Бензол	неполярна	$10^{11} \div 10^{12}$	2,2
Трансформаторна олива	неполярна	$10^{10} \div 10^{13}$	2,2
Бензин	неполярна	$10^{10} \div 10^{13}$	2,0
Совол	полярна	$10^8 \div 10^{10}$	4,5
Касторова олива	полярна	$10^8 \div 10^{10}$	4,6
Ацетон	сильнополярна	$10^4 \div 10^5$	22
Етиловий спирт	сильнополярна	$10^4 \div 10^5$	33
Вода	сильнополярна	$10^3 \div 10^4$	81

Зменшити питому провідність можна шляхом очистки рідкого діелектрика. При довготривалому пропусканні електричного струму через неполярну рідину спостерігається зменшення електропровідності із-за переносу вільних іонів домішок до електродів. Цей процес носить назву електричної очистки діелектрика. Питома провідність будь-якої рідини залежить від температури. З її збільшенням збільшується рухливість іонів через зменшення в'язкості рідини, що призводить до збільшення електропровідності.

### 1.4. Поляризація діелектриків

Найважливішою властивістю діелектриків є їхня здатність до поляризації під дією прикладної електричної напруги. Процес поляризації є зміною розташування у просторі частинок діелектрика, які мають електричні заряди, причому діелектрик одержує індукований електричний момент, а в конденсаторі, який утворений діелектриком з електродами утворюється електричний заряд.

Інтенсивність поляризації визначається вектором поляризації (поляризованістю)  $\vec{P}$ , що вимірюється в Кл/м<sup>2</sup>. В однорідному полі, коли дипольні електричні моменти всіх  $n$  молекул орієнтовані паралельно, поляризованість визначається за формулою [8]:

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{\mu}_i}{S \cdot h}, \quad (1.18)$$

де  $\vec{\mu}_i$  – сумарний електричний момент молекули;  $V = S \cdot h$  – об'єм діелектрика між обкладками конденсатора.

Оскільки у глибині однорідного діелектрика додатні і від'ємні заряди взаємно компенсуються, то некомпенсовані електричні заряди залишаються на поверхні діелектрика. Таким чином, у випадку однорідного електричного поля поляризованість діелектрика дорівнює поверхневій густині його зарядів. Якщо збільшувати напруженість електричного поля, то поверхнева густина електричних за-

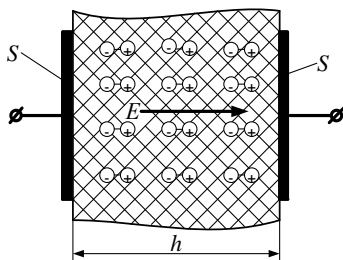


Рис.1.15. Розміщення зарядів у поляризованому діелектрику

рядів буде також збільшуватись, відповідно буде збільшуватись і поляризованість діелектрика.

Для більшості діелектриків поляризованість прямопропорційна напруженості електричного поля  $\vec{P} = \alpha \vec{E}$  і їх називають лінійними. В деяких діелектриків, особливо у сегнетоелектриків ця залежність не є прямопропорційною і їх називають нелінійними. В останній час вони знаходять все ширше застосування, оскільки дають змогу керувати електричними та оптичними властивостями матеріалів шляхом зміни напруженості електричного поля, температури і т.д.

Діелектрик, ввімкнений в електричне коло, можна розглядати як конденсатор визначеної ємності.

Величина заряду (Кл) визначається, як:

$$Q = C \cdot U, \quad (1.19)$$

де  $C$  – ємність конденсатора, Ф;  $U$  – напруга, В.

При послідовному з'єднанні конденсаторів (рис.1.16,а) еквівалентна ємність буде виражена формулою:

$$\frac{1}{C_{екв}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (1.20)$$

При паралельному з'єднанні конденсаторів (рис.1.16,б) сумарна (еквівалентна) ємність дорівнює сумі ємностей віток:

$$C_{екв} = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (1.21)$$

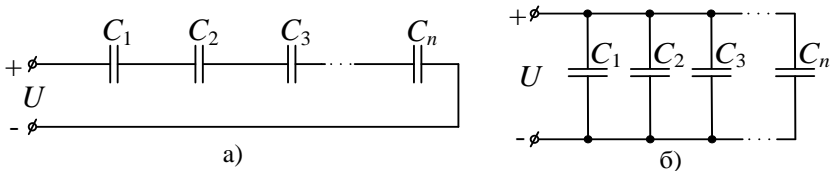


Рис.1.16. Послідовне (а) і паралельне (б) з'єднання конденсаторів

Енергія електричного поля (Дж), що накопичена в ділянці ізоляції з ємністю  $C$ , до якої прикладена напруга  $U$ :

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}. \quad (1.22)$$

У будь-якому діелектрику, поміщеному в електричне поле, спостерігаються такі явища: зміщення зарядів різних видів поляризації, переміщення зарядів або струму по об'єму структури або на поверхні та нагрів діелектрика від енергії розсіяння [3].

Ємність конденсатора з діелектриком і накопичений в ньому електричний заряд зумовлені сумарною дією механізмів поляризації, що представлені на схемі заміщення діелектрика (рис.1.17).

*Електронна поляризація* є пружним зміщенням і деформацією електронних оболонок атомів та іонів. Діелектрична проникність речовини з чисто електронною поляризацією чисельно дорівнює квадрату показника заломлення світла  $n$ . Електронна поляризація спостерігається в усіх видах діелектриків і не пов'язана з втратою енергії. Час встановлення електронної поляризації складає близько  $10^{-15}$  с. Вона практично не залежить від частоти електромагнітного поля і температури.

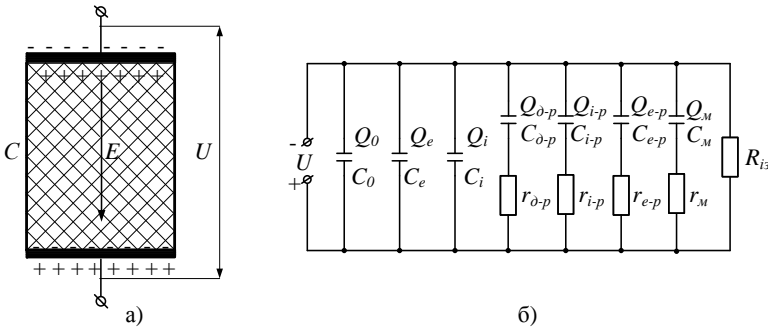


Рис.1.17. Діелектрик складної будови з різними механізмами поляризації в електричному полі (а) і його еквівалентна схема (б)

*Іонна поляризація* характерна для твердих тіл з іонною будовою і зумовлюється зміщенням жорстко зв'язаних іонів. З підвищенням температури поляризованість посилюється в результаті послаблення жорстких сил між іонами із-за збільшення відстані між ними при тепловому розширенні. Час встановлення іонної поляризації складає близько  $10^{-13}$  с.

*Дипольно-релаксаційна поляризація* відрізняється від електронної та іонної тим, що вона пов'язана з тепловим рухом частинок. Дипольні молекули, що знаходяться в хаотичному тепловому русі, частково орієнтуються під дією поля, що і є причиною поляризації. При знятті поля поляризація порушується, рух молекул стає хаотичним, а поляризованість  $P$  зменшується за експоненціальним законом:

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1.23)$$

де  $P_0$  – поляризованість в момент зняття напруженості,  $\tau$  – постійна часу цього процесу або час релаксації дипольної поляризації.

Час релаксації – це час, протягом якого поляризованість діелектрика після зняття напруженості поля зменшується внаслідок теплового руху молекул в  $e \approx 2,718$  рази від початкового. Зазвичай  $\tau = (10^{-6} \div 10^{-10} \text{ с})$ , а відповідно така поляризація проявляється лише на частотах нижчих  $10^6 \div 10^{10}$  Гц.

*Іонно-релаксаційна поляризація* спостерігається в неорганічному склі і в деяких неорганічних кристалічних речовинах. Тут слабозв'язані іони речовини під дією електричного поля зміщуються в напрямі поля на відстань, що перевищує постійну кристалічної ґратки. При цьому виді поляризації виникають втрати енергії і поляризація суттєво посилюється з підвищенням температури

*Електронно-релаксаційна поляризація* характерна для діелектриків з високими ступенем заломлення та електронною електропровідністю.

*Міграційна поляризація* розуміється як додатковий механізм поляризації, що може проявлятися у твердих діелектриках з неоднорідною структурою та наявністю домішок. Ця поляризація проявляється 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.

Залежно від виду поляризації всі діелектрики діляться на кілька груп.

До першої групи можна віднести діелектрики, що мають в основному, тільки електронну поляризацію, наприклад, неполярні і слабополярні тверді речовини у кристалічному і аморфному станах (парафін, сірка, полістирол), а також неполярні і слабополярні рідини і гази (бензол, водень та ін.).

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

Третю групу складають тверді неорганічні діелектрики з електронною, іонною та іонно-електронно-релаксаційною поляризаці-

ями. Сюди відносять кристалічні речовини з щільним упакуванням іонів (кварц, слюда, кам'яна сіль, корунд, рутил), а також неорганічне скло, порцеляну, мікалекс тощо.

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

Наведена вище класифікація діелектриків дає змогу визначати їх основні електричні властивості.

### 1.5. Діелектрична проникність

Про явище поляризації судять за значенням діелектричної проникності  $\epsilon$ . Параметр матеріалу, що характеризує здатність матеріалу утворювати ємність, називається **діелектричною проникністю**  $\epsilon$ , що показує, у скільки разів збільшується ємність конденсатора, коли між пластини конденсатора внести певний ізоляційний матеріал, не змінюючи габаритів конденсатора, у порівнянні з вакуумом. Потрібно врахувати, що ємність конденсатора залежить від його геометричних розмірів і властивостей матеріалу [12]

$$C = \epsilon C_0 = \epsilon_0 \epsilon \Lambda; \quad \Lambda = \frac{S}{h}; \quad C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{h}, \quad (1.24)$$

де  $C_0$  – ємність вакуумного конденсатора, Ф;  $S$  – площа обкладок конденсатора, м<sup>2</sup>;  $h$  – товщина ізоляційного шару, м;  $\epsilon_0$  – електрична постійна,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\Lambda$  – приведена довжина конденсатора, м.

Добуток  $\epsilon_0 \cdot \epsilon$  називається абсолютною діелектричною проникністю або питомою ємністю конденсатора.

*Для плоского конденсатора:*

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{h}. \quad (1.25)$$

*Для циліндричного конденсатора:*

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{2\pi l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} = \epsilon_0 \epsilon \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 2,42 \cdot 10^{-11} \frac{\epsilon l}{\lg \frac{d_2}{d_1}} = 2,42 \cdot 10^{-11} \frac{\epsilon l}{\lg \frac{r_2}{r_1}}. \quad (1.26)$$

Тут  $l$  – довжина конденсатора, м;  $r_1, r_2$  – радіуси внутрішньої і зовнішньої обкладок, м.



Якщо  $d_2 - d_1 \ll d_1$ , то у відповідності з формулою (1.11):

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \pi l \frac{d_2 + d_1}{d_2 - d_1} = 2,78 \cdot 10^{-11} \varepsilon l \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}. \quad (1.27)$$

Для сферичного конденсатора:

$$C = 4\pi \varepsilon \varepsilon_0 \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}. \quad (1.28)$$

Для кабелів, систем паралельних провідників введемо поняття питомої ємності [12].

$$K = \frac{C}{l} \left[ \frac{\text{мкФ}}{\text{км}} \right]. \quad (1.29)$$

Для коаксіального кабелю:

$$K = 0,024 \frac{\varepsilon}{\lg \frac{d_2}{d_1}} = 0,024 \frac{\varepsilon}{\lg \frac{r_2}{r_1}}. \quad (1.30)$$

Для двох паралельних круглих проводів діаметром  $d(r)$  кожний і при віддалі між осями проводів  $h$  за умови ( $d \ll h$ ):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot 10^{-9} \frac{\pi l}{\ln \frac{d}{2h}} = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot 10^{-9} \frac{\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 0,0121 \frac{\varepsilon}{\lg \frac{d}{2h}} = 0,0121 \frac{\varepsilon}{\lg \frac{r}{h}}. \quad (1.31)$$

Запишемо формули для опору та ємності ділянки ізоляції.

$$R = \frac{\rho}{\Lambda}, \quad C = \varepsilon_0 \varepsilon \Lambda. \quad (1.32)$$

Перемноживши праві і ліві частини рівняння (1.32), одержимо:

$$CR = \varepsilon_0 \varepsilon \rho. \quad (1.33)$$

Таким чином для будь-якого конденсатора або ділянки ізоляції добуток  $CR$  не залежить від габаритів і форми конденсатора, а залежить винятково від  $\varepsilon$  і  $\rho$  діелектрика.

Тому, маючи вираз для ємності ділянки ізоляції, легко отримати вирази для об'ємного опору цієї ділянки і навпаки.

Іноді у випадку, коли об'ємний струм  $I_V$  значно перевищує поверхневий  $I_S$ , то в цю формулу може бути підставлено  $CR_{i3}$ . Добуток  $CR_{i3}$  має певний фізичний зміст: він є опором ізоляції, віднесеним до одиниці ємності. Крім цього, цей добуток характеризує процес саморозряду конденсатора.

Рівняння напруги  $u$  на конденсаторі у функції часу  $t$ , що був під постійною напругою  $U_0$  для схеми заміщення (рис.1.18) має вигляд [12]:

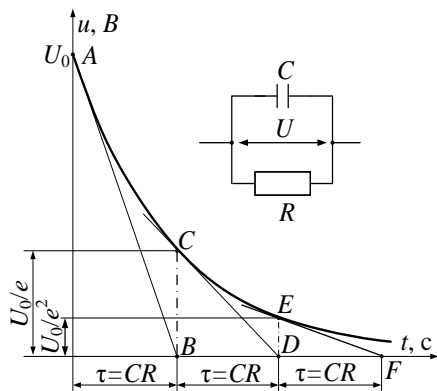


Рис.1.18. Залежність  $u = f(t)$  конденсатора при його саморозряді та схема заміщення

$$u = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{CR_{i3}}} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.34)$$

$\tau = CR_{i3}$  – постійна саморозряду, тобто час, за який напруга  $u$  на конденсаторі зменшується в  $e = 2,718$  разів, що дорівнює у відповідному масштабі відрізкам  $OB$ ,  $BD$ ,  $DF$  і т.д.

Чим більше  $CR_{i3}$ , тим якість ізоляції якнайкраща.

На практиці часто  $C$  вимірюють у мкФ, а  $R_{i3}$  у МОм. (1мкФ·1 МОм = 1 сек.).

На практиці часто приходиться стикатися із задачею визначення діелектричної проникності  $\epsilon_c$  композиційного твердого діелектрика, що є сумішшю двох або більше компонентів.

Діелектрична проникність складних (композиційних) діелектриків може бути в першому наближенні визначена на основі логарифмічного закону [12]:

$$\epsilon^x = y_1 \cdot \epsilon_1^x + y_2 \cdot \epsilon_2^x + \dots + y_n \cdot \epsilon_n^x, \quad (1.35)$$

де  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$  – відносні діелектричні проникності першого, другого і  $n$ -го компонентів суміші;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  – об'ємні концентрації першого, другого і  $n$ -го компонентів.

Сума концентрацій задовольняє умові:  $y_1 + y_2 + \dots + y_n = 100\%$  або  $y_1 + y_2 + \dots + y_n = 1$  (у відносних одиницях),  $x$  – константа, що задовольняє умові  $-1 \leq x \leq 1$ , і характеризує шаровий розподіл компонентів.

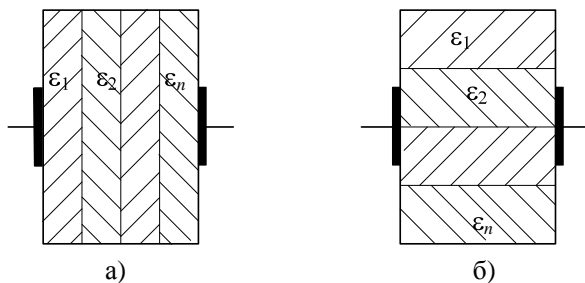


Рис.1.19. Плоский конденсатор з різними діелектриками ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ ), що з'єднані послідовно (а) і паралельно (б)

Для паралельного сполучення діелектриків ( $x = 1$ ):

$$\epsilon_c = y_1 \cdot \epsilon_1 + y_2 \cdot \epsilon_2 + \dots + y_n \cdot \epsilon_n. \quad (1.36)$$

Для послідовного сполучення компонентів ( $x = -1$ ). У випадку двошарового діелектрика формула (1.35) набуває вигляду:

$$\frac{1}{\epsilon_c} = \frac{y_1}{\epsilon_1} + \frac{y_2}{\epsilon_2} \quad \text{або} \quad \epsilon_c = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{y_1 \epsilon_2 + y_2 \epsilon_1}. \quad (1.37)$$

Формули (1.36), (1.37) можуть використовуватись в багатьох практичних випадках. Встановлено, що для конденсаторного паперу досить добре підходить модель послідовно з'єднаних шарів паперу і повітря.

Для хаотичного розташування компонентів у суміші (пластмаси, кераміка) формули (1.36), (1.37) непридатні і дійсне значення діелектричної проникності суміші  $\epsilon_c$  лежить між значеннями, що визначаються за цими формулами. Це схематично зображено на рис.1.20. Тут пряма 1 відповідає паралельному, крива 2 послідовному, крива 3 хаотичному (змішаному) з'єднанню шарів.

Хаотичний розподіл компонентів з достатньою точністю реалізує формула Ліхтенеккера або логарифмічний закон змішування:

$$lg \epsilon_c = y_1 \cdot lg \epsilon_1 + y_2 \cdot lg \epsilon_2 + \dots + y_n \cdot lg \epsilon_n. \quad (1.38)$$

Слід відмітити, що формула (1.38) придатна для розрахунку не тільки діелектричної проникності, але й магнітної проникності і питомої електропровідності сумішей. У всіх випадках потрібно вважати, що компоненти утворюють тісну фізичну суміш, але хімічно один з одним не реагують.

Для спрощення розрахунків (у випадку двох компонентів) за формулою (1.38) може бути використана номограма (рис.1.21). На трьох її шкалах відкладені  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  (для випадку  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ),  $y_1$  ( $y_2$ ) і  $\varepsilon_c/\varepsilon_2$ . Точки на шкалах, що відповідають умові (1.38) лежать на одній прямій, так, що за двома відомими величинами легко знаходиться третя.

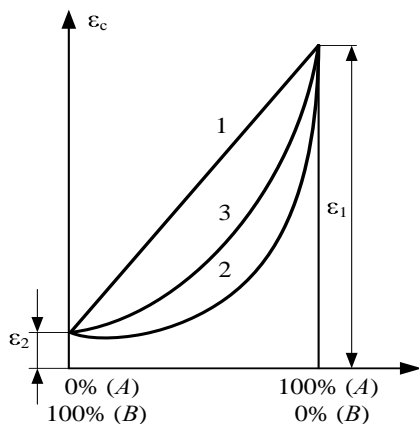


Рис.1.20. Характер залежностей діелектричної проникності суміші  $\varepsilon_c$  двох компонентів А і В

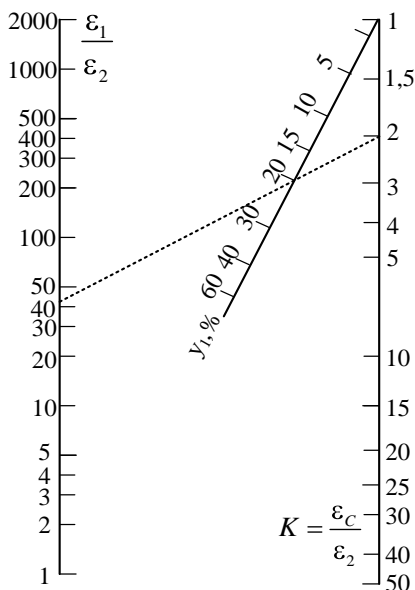


Рис.1.21. Номограма розрахунку діелектричної проникності суміші за формулою (1.38)

Як приклад, на номограмі показано знаходження діелектричної проникності  $\varepsilon_c$  для пластмаси, що складається із 20 % наповнювача ( $y_1 = 0,2$ ) – порошка рутилу ( $\varepsilon_1 = 110$ ) і 80 % ( $y_2 = 0,8$ ) зв'язуючого – полістиролу ( $\varepsilon_2 = 2,6$ ). Пунктирна пряма, що з'єднує точки  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 42,4$  і  $y_1 = 0,2$  ( $y_2 = 0,8$ ), перетинає третю шкалу в точці  $\varepsilon_c/\varepsilon_2 = 2$ . Таким чином,  $\varepsilon_c = 2 \cdot 2,6 = 5,2$ .

У ряді випадків приходиться мати справу не з об'ємними концентраціями  $y_1, y_2, \dots, y_n$  компонентів у суміші, а з їх масовими концентраціями  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ( $x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1$ ). В цьому випадку для переходу до формули (1.38) використовуються формули, отримані на основі арифметичного закону змішування. У випадку двох компонентів, що розподілені хаотично у суміші, маємо:

$$y_1 = x_1 \frac{D_c}{D_1} = \frac{D_1 \cdot D_c - D_2}{D_1 - D_2}; \quad y_2 = x_2 \frac{D_c}{D_2} = \frac{D_2 \cdot D_c - D_1}{D_2 - D_1}; \quad (1.39)$$

$$D_c = y_1 D_1 + y_2 D_2 = \frac{D_1 + D_2}{x_1 D_1 + x_2 D_2}.$$

де  $D_1, D_2, D_c$  – густини 1-го, 2-го компонентів та суміші в цілому.

Температурний коефіцієнт діелектричної проникності суміші отримується диференціюванням за температурою формули (1.39):

$$\frac{1}{\varepsilon_c} \frac{d\varepsilon_c}{dT} = \frac{y_1}{\varepsilon_1} \frac{d\varepsilon_1}{dT} + \frac{y_2}{\varepsilon_2} \frac{d\varepsilon_2}{dT} \quad \text{або} \quad \alpha_{\varepsilon_c} = y_1 \alpha_{\varepsilon_1} + y_2 \alpha_{\varepsilon_2}. \quad (1.40)$$

Таким чином логарифмічний закон змішування для діелектричних проникностей (1.38) відповідає арифметичному закону змішування для температурних коефіцієнтів діелектричних проникностей  $\alpha_{\varepsilon_c}$ , тобто прямолінійній залежності  $\alpha_{\varepsilon_c}$  від концентрацій компонентів, в той час як закони (1.36), (1.37) призведуть до криволінійних залежностей  $\alpha_{\varepsilon_c}$  від концентрацій  $y_1$  і  $y_2$ .

Діелектрична проникність *твердих діелектриків*, в яких можливі всі види поляризацій, має найменше значення, якщо структура матеріалу побудована з нейтральних молекул і володіє електронною поляризацією, тоді  $\varepsilon = n^2$ . Температурна залежність  $\varepsilon$  визначається зміною числа молекул в одиниці об'єму.

Для нейтральної молекули, парафіну, зниження  $\varepsilon$  очікується за температури плавлення (рис.1.23).

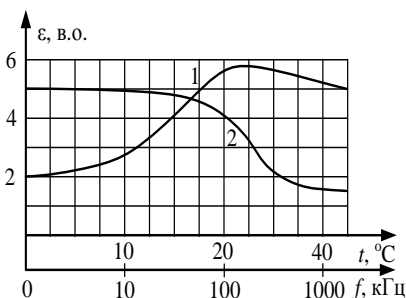


Рис.1.22. Залежність діелектричної проникності від частоти (1) і від температури (2) для соволу

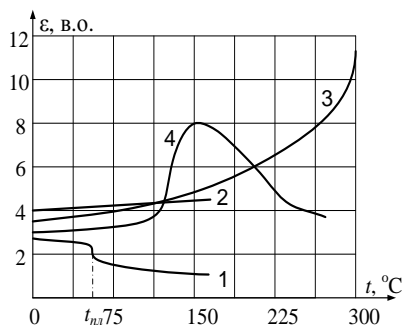


Рис.1.23. Температурні залежності діелектричної проникності для парафіну (1), іонного кристалу (2), фарфору (3), целюлози (4)

У таблиці 1.4 показано значення діелектричних проникностей деяких діелектриків

Табл.1.4.

Діелектрик		$\epsilon$	Вид поляризації
Неполярний твердий	Парафін	1,9÷2,2	електронна
	Полістирол	2,4÷2,6	
	Сірка	2,6÷4,0	
	Алмаз	5,6÷5,8	
Іонний кристал	$NaCl$ (сіль кам'яна)	6	електронна, іонна
	$Al_2O_3$ (оксид алюмінію)	10	
	$TiO_2$ (рутил)	110	
	$CaO \cdot TiO_2$ (титанат кальцію)	150	
Неорганічне скло	плавлений кварц	4,5	електронна, іонна
	лужне скло	6,5	
	баритове скло	10	
Органічне скло	целюлоза	6,5	електронна, іонна
	фенолформальдегідна смола	4,5	
	органічне скло	4	
Сегнетоелектрики	$NaKCuH_4O_6 \cdot 4H_2O$ (сегнетова сіль)	500÷600	електронна, іонна, іонно-релаксаційна
	$BaTiO_3$ (титанат барію)	1500÷2000	

Діелектрична проникність газів внаслідок їх низької густини (із-за великих відстаней між молекулами) незначна і близька до одиниці. Зазвичай поляризація газу є електронною чи дипольною, якщо молекули полярні. Діелектрична проникність газу тим вища, чим більший радіус молекули. Зміна числа молекул газу в одиниці об'єму газу  $n$  під час зміни температури і тиску викликає зміну діелектричної проникності газу. Число молекул  $N$  пропорційне тиску і обернено пропорційно абсолютній температурі.

Зі зміною вологості діелектрична проникність повітря змінюється незначно, прямопропорційно зміні його вологості. При підвищеній температурі вплив вологості різко посилюється. Температурний коефіцієнт діелектричної проникності визначається виразом:

$$TK\varepsilon = \alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dT}. \quad (1.41)$$

Для неполярного газу:

$$TK\varepsilon = \alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon - 1}{dT}. \quad (1.42)$$

Діелектрична проникність *рідин* сильно залежить від їх структури. Значення  $\varepsilon$  неполярних рідин невисокі і близькі до квадрату заломлення світла  $n^2$ . Діелектрична проникність полярних рідин, які використовуються в якості технічних діелектриків, лежить у межах від 3,5 до 5, що суттєво більше, ніж у неполярних рідин. Так, поляризація рідин, що містять дипольні молекули, визначається одночасно електронною і дипольно-релаксаційною поляризаціями.

Сильнополярні рідини характеризуються високим значенням  $\varepsilon$  через їх високу провідність. Температурна залежність  $\varepsilon$  в дипольних рідинах має більш складний характер, ніж у нейтральних рідинах. Тому  $\varepsilon$  на частоті 50 Гц для хлорованого дифенілу (соволу) швидко зростає із-за різкого падіння в'язкості рідини, а дипольні молекули встигають орієнтуватись услід за зміною температури. Зменшення  $\varepsilon$  проходить внаслідок посилення теплового руху молекул, що перешкоджає їх орієнтації в напрямі ліній електричного поля.

## 1.6. Розрахунок поля в багатошарових діелектриках

Величина діелектричної проникності  $\varepsilon$  є важливою і під час розрахунку напруженості електричного поля в багатошарових діелектриках [12]. Розглянемо спочатку зміну напруженості поля на прикладі двошарового діелектрика при змінній напрузі. Найпростіший випадок двошарового плоского конденсатора представлено на рис.1.24. Комбінуючи умову послідовного з'єднання шарів маємо:

$$U = U_1 + U_2 = E_1 h_1 + E_2 h_2. \quad (1.43)$$

$$E_1 = \varepsilon_2 \frac{U}{h_1 \varepsilon_2 + h_2 \varepsilon_1}; \quad E_2 = \varepsilon_1 \frac{U}{h_1 \varepsilon_2 + h_2 \varepsilon_1}. \quad (1.44)$$

$$U_1 = \frac{\varepsilon_2 h_1 U}{h_1 \varepsilon_2 + h_2 \varepsilon_1}; \quad U_2 = \frac{\varepsilon_1 h_2 U}{h_1 \varepsilon_2 + h_2 \varepsilon_1}. \quad (1.45)$$

Графік падіння потенціалу в функції віддалі від електроду  $Y$  зображено на рис.1.24 ламаною  $PQR$ , а графік значень  $E$  – ламаною  $KLMNT$ . Функції  $tg\beta_1$  і  $tg\beta_2$  пропорційні значенням  $E_1$  і  $E_2$  відповідно.

Якщо б у просторі між електродами конденсатора  $Y$  і  $Z$  знаходився один діелектрик, то мали б випадок плоского конденсатора з однорідним полем. В цьому випадку падіння потенціалу визначалось би пунктирною лінією  $PR$ , а напруженість поля – пунктирною горизонтальною прямою  $ST$  і напруженість поля у всьому об'ємі діелектрика була б однаковою, причому  $\beta_1 < \beta_0 < \beta_2$  і  $E_1 < E < E_2$ .

У загальному випадку для багат шарового діелектрика напруженість  $i$ -го шару визначиться за формулою:

$$E_i = \frac{U}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\epsilon_i}}, \quad U_i = E_i \cdot h_i, \quad (1.46)$$

де  $U$  – повна напруга на конденсаторі, а  $U_i$ ,  $E_i$ ,  $h_i$ ,  $\epsilon_i$  – відповідно напруга, напруженість, товщина та діелектрична проникність для окремих шарів.

При конструюванні і розрахунку багат шарової ізоляції потрібно враховувати, що шари діелектриків з більш високою діелектричною проникністю прагнуть “розвантажитися” і перекласти більшу частину напруги на шари з меншою діелектричною проникністю. Особливо в невідгідному положенні є повітряні проміжки всередині ізоляційного шару.

Для одношарового циліндричного конденсатора для точки в діелектрику між електродами на відстані  $x$ , м, від осі конденсатора ( $r_1 \leq x \leq r_2$ ) напруженість  $E_x$  дорівнює:

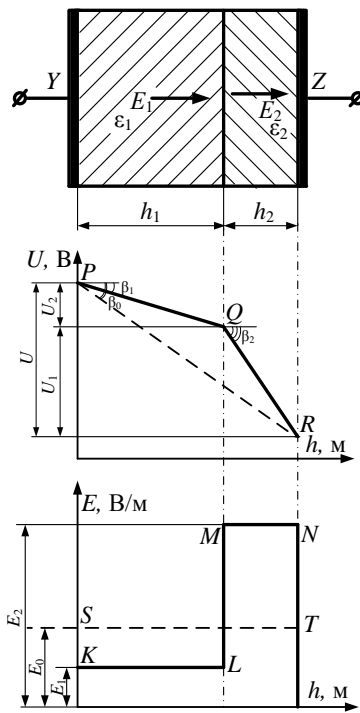


Рис.1.24. Картина електричного поля у двошаровому діелектрику



$$E_x = \frac{U}{x \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = 0,434 \frac{U}{x \cdot \lg \frac{r_2}{r_1}}. \quad (1.47)$$

Таким чином, у циліндричному конденсаторі поле неоднорідне: найбільша величина напруженості поля має місце в точках діелектрика, безпосередньо прилягаючих до внутрішнього діаметра електрода ( $x = r_1$ ):

$$E_{max} = 0,434 \frac{U}{r_1 \cdot \lg \frac{r_2}{r_1}}, \quad (1.48)$$

а найменша – в точках, що прилягають до зовнішнього електрода ( $x = r_2$ ). Для проміжних точок графік залежності  $E_x = f(x)$  має вигляд гіперболи.

Якщо ж діелектрик циліндричного конденсатора – багатошаровий ( $n$  шарів), то напруженість в  $i$ -му шарі на відстані  $x$  від осі конденсатора ( $r_{1i} \leq x \leq r_{2i}$ ) залежить від значень  $\epsilon_i$  діелектричних проникностей матеріалів шарів і дорівнює:

$$E_x = \frac{U}{\epsilon_i \cdot x \sum_{i=1}^n \frac{\ln \left( \frac{r_{2i}}{r_{1i}} \right)}{\epsilon_i}}. \quad (1.49)$$

Як видно з формул (1.44) і (1.49), на відміну від випадку багатшарового плоского конденсатора порядок розміщення матеріалів у шарах циліндричного конденсатора впливає на значення напруженості поля в окремих шарах. Для того, щоб отримати найбільш вигідний розподіл напруженостей, тобто отримання найменших значень  $E_i$ , потрібно розміщувати у внутрішні шари багатшарового циліндричного конденсатора діелектрики з високими значеннями  $\epsilon$ . Це частковий випадок загального правила: в нерівномірному полі для зменшення електричного навантаження електроізоляційних матеріалів слід у місця з найбільшим електричним зміщенням  $D = \epsilon_0 \epsilon_1 E_1 = \epsilon_0 \epsilon_2 E_2$  поміщати матеріали з найбільшим значенням  $\epsilon$ . Всі ці положення, як було вказано вище, справедливі для змінного струму.

Для розрахунку електричного поля в багатошаровій ізоляції, що працює під постійною напругою у формулах (1.44)-(1.46), (1.49) замість значень  $\epsilon$  потрібно підставляти значення об'ємної питомої провідності  $\gamma$  матеріалів відповідних шарів.

### 1.7. Діелектричні втрати

*Діелектричні втрати* – це електрична потужність, що розсіюється в діелектрику у вигляді тепла під дією прикладеного до нього електричного поля. Втрати в діелектриках спостерігаються як при змінній напрузі, так і при постійній, оскільки у матеріалі присутній наскрізний струм, що зумовлений провідністю. При постійному струмі, коли немає періодичної поляризації, якість матеріалу характеризується значеннями питомих об'ємного і поверхневого опорів [3].

Якщо ділянка ізоляції з опором  $R_B$  (Ом) знаходиться під постійною напругою  $U$  і через ізоляцію протікає струм витікання  $I$ , тоді величина втрат дорівнює:

$$P_{\text{в}} = \frac{U^2}{R_B} = I^2 \cdot R_B = U \cdot I. \quad (1.50)$$

Недопустимо великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильний нагрів виготовленого з нього виробу і можуть призвести до його теплового руйнування.

Природа діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах різноманітна в залежності від агрегатного стану речовини.

Діелектричні втрати можуть бути зумовлені наскрізним струмом або активними складовими поляризаційних струмів. При вивченні діелектричних втрат, безпосередньо пов'язаних з поляризацією діелектрика, можна показати це явище у вигляді графіків, що є залежністю електричного заряду на обкладках конденсатора від прикладеної до нього напруги (рис.1.25). При відсутності втрат, які були викликані явищем поляризації, заряд лінійно залежить від напруги (рис.1.25, а), і такий діелектрик називається лінійним. Якщо у лінійному діелектрику має місце уповільнена поляризація, пов'язана з втратами енергії, то крива залежності заряду від напруги має вигляд еліпса (рис.1.25, б). Площа цього еліпса пропорційна кількості енергії, що поглинається діелектриком за один період зміни напруги. У випадку сегнетоелектрика крива залежності заряду від

напруги має вигляд петлі такого ж характеру, як петля гістерезису в магнітних матеріалах; в цьому випадку площа петлі пропорційна втратам енергії за один період.

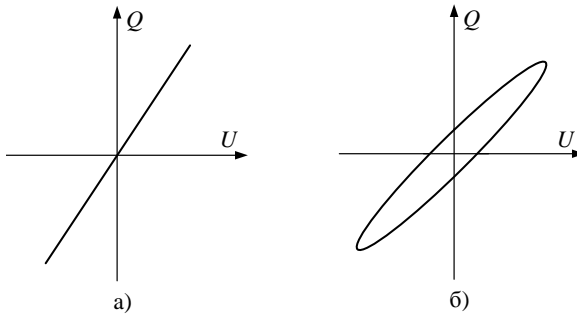


Рис.1.25. Залежність заряду від напруги для лінійного діелектрика без втрат (а), з втратами (б)

Розглянемо схему, що еквівалентна конденсатору з діелектричними втратами і який знаходиться в колі змінного струму (рис.1.26). Ця схема повинна бути вибрана так, щоб активна потужність, що є в даній схемі дорівнювала потужності, що розсіюється в діелектрику конденсатора, а струм випереджував напругу на цей же кут, що і в діелектрику.

Поставлена задача може бути розв'язана заміною конденсатора з втратами ідеальним конденсатором з послідовно ввімкненим активним опором або ідеальним конденсатором, що шунтований активним опором [3].

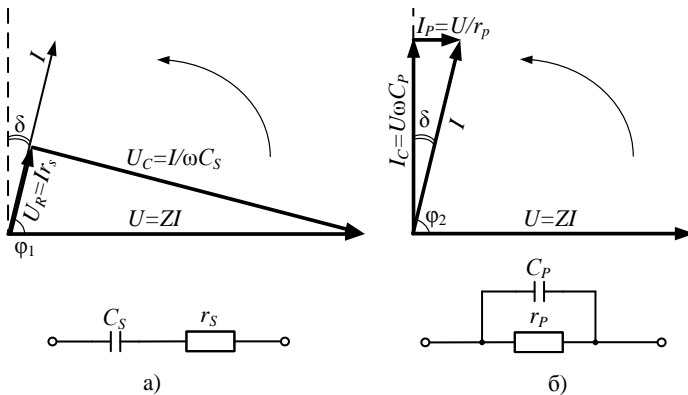


Рис.1.26. Векторні діаграми та еквівалентні схеми заміщення діелектрика з втратами: а) послідовна; б) паралельна

Послідовна та паралельна схеми будуть еквівалентними одна одній, якщо при рівності повних опорів  $z_1 = z_2 = z$  однакові їх активні та реактивні складові. Ця умова буде виконана, якщо кути зсуву  $\varphi$  струму відносно напруги однакові, а також однакові значення активної потужності.

Із теорії синусоїдного струму відомо, що активна потужність

$$P = UI \cos \varphi. \quad (1.51)$$

Виразимо потужності для послідовної та паралельної схем через ємності  $C_S$  і  $C_P$ .

Для послідовної схеми:

$$P_a = \frac{U}{z} \cdot \frac{U r_s}{z} = \frac{U^2 r_s}{x^2 + r_s^2} = \frac{U^2 r_s}{x^2 \left(1 + \frac{r_s^2}{x^2}\right)} = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad \operatorname{tg} \delta = \omega C_s r_s. \quad (1.52)$$

Для паралельної схеми:

$$P_a = UI_a = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{x}{r_p} = \frac{1}{\omega C_p r_p}. \quad (1.53)$$

Прирівнюючи рівняння (1.52) та (1.53) знаходимо співвідношення між  $C_S$  і  $C_P$ , між  $r_s$  і  $r_p$

$$C_P = \frac{C_S}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad \text{і} \quad r_p = r_s \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right). \quad (1.54)$$

Для високоякісних діелектриків можна знехтувати значеннями  $\operatorname{tg}^2 \delta$  і вважати  $C_S \approx C_P \approx C$ . Тоді вирази (1.52), (1.53) будуть однакові для двох схем:

$$P_{\approx} = U^2 \cdot C \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1.55)$$

де  $U$  – прикладена до діелектрика змінна синусоїдна напруга, В;  $C$  – ємність ділянки ізоляції, Ф;  $\omega = 2\pi f$  – колова частота струму,  $\text{с}^{-1}$ ;  $f$  – частота змінного струму, Гц;  $\delta$  – кут діелектричних втрат, що доповнює до  $90^\circ$  кут зсуву фаз  $\varphi$  між струмом і напругою. Чим менший цей кут, тим якісніший діелектрик.

Отже, діелектричні втрати пропорційні квадрату прикладеної напруги і частоті її зміни. Тому, вони досягають найбільших значень у діелектриках, що використовуються в установках високих напруг і високочастотній апаратурі.

Для розрахунку діелектричних втрат в одиниці об'єму, де напруженість поля дорівнює  $E$ , МВ/м і присутня будь-яка картина електричного поля (рівномірна, нерівномірна), а також у будь-якому неоднорідному діелектрику, приймається емпірична формула [3]:

$$p_{\Sigma} = \frac{P_a}{V} = E^2 \cdot 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta = E^2 \cdot \frac{\varepsilon f \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}} = E^2 \cdot \gamma. \quad (1.56)$$

Добуток відносної діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат  $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$  називається коефіцієнтом діелектричних втрат матеріалу.

Отже, питомий опір діелектриків можна визначити за формулою:

$$\rho = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta}, \quad \text{Ом}. \quad (1.57)$$

Ця рівність пов'язує питомий об'ємний опір  $\rho$ , виміряний на постійному струмі, з параметрами  $\varepsilon$  і  $\operatorname{tg} \delta$  на змінному струмі при частоті  $f$ .

На рис.1.27, показано залежності діелектричних втрат ( $\operatorname{tg} \delta$ ) для деяких матеріалів при зміні температури, на рис.1.28 залежність діелектричних втрат від частоти при різних температурах для високочастотного діелектрика.

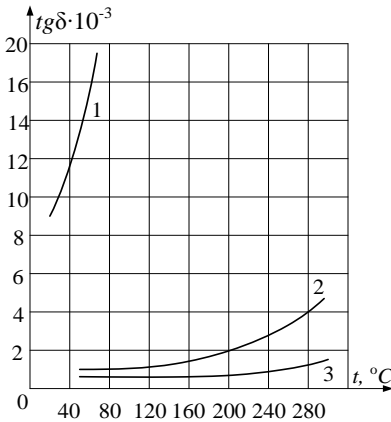


Рис.1.27. Залежність  $\operatorname{tg} \delta = f(t)$ :  
1 – електротехнічний фарфор,  
2 – ультрафарфор, 3 – алюмініоксид

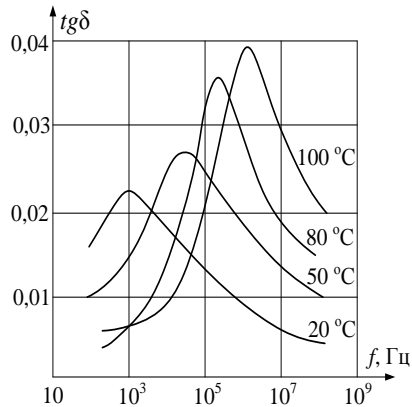


Рис.1.28. Залежність  $\operatorname{tg} \delta$  полярного діелектрика фторопласту-3 від частоти при різних температурах

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

- діелектричні втрати, зумовлені поляризацією;
- діелектричні втрати, зумовлені наскрізною провідністю;
- іонізаційні діелектричні втрати;
- діелектричні втрати, зумовлені неоднорідністю структури матеріалу.

*Перший вид* чітко спостерігається у матеріалах, що мають релаксаційну поляризацію. Це діелектрики дипольної структури 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 та нагрівання діелектрика. Діелектричні втрати в сегнетоелектриках пов'язані з явищем спонтанної поляризації. Втрати в сегнетоелектриках є значними при температурі, нижчій точки Кюрі, а при температурі більшій точки Кюрі втрати в сегнетоелектриках зменшуються.

*Другий вид* характерний для діелектриків, що мають об'ємну чи поверхневу електропровідність. Діелектричні втрати зростають із температурою за експоненціальним законом [8]

$$P_T = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \quad (1.58)$$

де  $A$ ,  $b$  – постійні матеріалу.

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

$$P_i = A \cdot f U - U_0^3, \quad (1.59)$$

де  $A$  – постійний коефіцієнт,  $f$  – частота електричного поля,  $U$  – прикладена напруга,  $U_0$  – напруга, що відповідає початку іонізації. Формула (1.59) справедлива при  $U > U_0$  і лінійній залежності  $\text{tg}\delta = f(E)$ .

Напруга  $U_0$  залежить від тиску, оскільки розвиток ударної іонізації молекул залежить від довжини вільного пробігу носіїв заряду. Зі збільшенням тиску газу величина напруги початку іонізації зростає.

Четвертий вид спостерігається у діелектриках із просоченого паперу і тканини, у пластмасах із наповнювачем, у пористій кераміці та слюді. Оскільки структура неоднорідних діелектриків і їх компонентів досить різна, то не існує загальної формули розрахунку діелектричних втрат у цьому випадку.

### 1.7.1. Діелектричні втрати в газах

Діелектричні втрати в *газах* дуже низькі. Основним джерелом діелектричних втрат у газах є електропровідність, тому що орієнтація дипольних молекул у газах при їх поляризації не супроводжується діелектричними втратами.

Усі гази характеризуються досить малою електропровідністю і кут діелектричних втрат дуже малий, особливо при високих частотах. Питомий об'ємний опір лежить у межах  $\rho_v \approx 10^{16}$  Ом·м,  $\varepsilon \approx 1$ ,  $tg\delta < 4 \cdot 10^{-8}$  при  $f = 50$  Гц. На рис. 1.29 наведена графічна залежність  $tg\delta = f(U)$  для газової ізоляції.

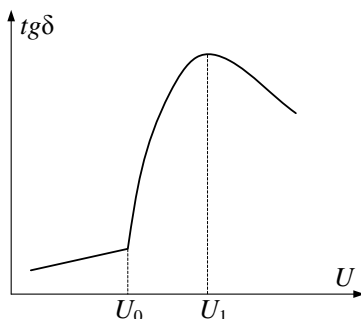


Рис. 1.29. Іонізаційна характеристика ізоляції

При високих напругах і неоднорідному полі, коли напруженість в окремих місцях перевищить деяке критичне значення, молекули газу іонізуються, внаслідок чого в газі виникають втрати на іонізацію.

При напрузі  $U_0$  відбувається початок іонізації газу і  $tg\delta$  помітно росте, а при напрузі  $U_1$  в повітряних включеннях газ уже іонізований і енергія на процес іонізації не витрачається,  $tg\delta$  зменшується. При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що це явище може призвести до розігріву діелектриків та їх руйнування, якщо напруга буде вище значення  $U_0$ .

### 1.7.2. Діелектричні втрати в рідинах

Діелектричні втрати в *рідинах* суттєво залежать від будови рідини: в *неполярних* рідинах (без домішок із дипольними молекулами), вони зумовлені тільки електропровідністю. Їх питома провід-

ність та діелектричні втрати також є малими. *Полярні* рідини в залежності від умов можуть мати великі втрати, пов'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією і втратами від електропровідності.

Застосовувані в техніці рідкі діелектрики можуть бути сумішшю полярних та неполярних речовин, наприклад, масляно-каніфольні компаунди. Рідкі полярні діелектрики мають суттєву залежність діелектричних втрат від їх в'язкості. Диполі, орієнтуючись у напрямі електричного поля, повертаються у в'язкому середовищі і викликають втрати енергії на тертя з виділенням теплоти.

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

Час релаксації – це час, за який впорядкованість зорієнтованих полем диполів після його зняття зменшується за рахунок наявності теплового руху в  $e \approx 2,7$  разів від початкового значення.

На рис.1.30 показана залежність  $tg\delta = f(t)$  при різних частотах для масляно-каніфольного компаунда. На графіку виділено чотири області, що характеризують:

1 – якщо в'язкість речовини велика (при малих температурах), то молекули не встигають зорієнтуватися при зміні поля і дипольно-релаксаційна поляризація зникає ( $tg\delta$  має мале значення (початок кривих));

2 – при середніх в'язкостях дипольні втрати можуть бути суттєві і при деякому значенні в'язкості мають максимум;

3 – дипольні втрати будуть малими, коли орієнтація молекул відбувається без тертя (мінімум кривої);

4 – подальше зростання  $tg\delta$  із підвищенням температури пояснюється ростом електропровідності (за рахунок діелектричних втрат наскрізної електропровідності).

Характер залежностей потужності  $P_a$ , що розсіюється при дипольно-релаксаційних втратах у рідкому діелектрику, а також  $tg\delta$  від частоти показаний на рис.1.31.

Втрати зростають із частотою доти, поки поляризація встигає слідувати за зміною поля. Коли ж частота стає настільки велика, що дипольні молекули вже не встигають орієнтуватися в напрямку поля і  $tg\delta$  падає, то втрати  $P_a$  стають постійними згідно з формулою (1.55).



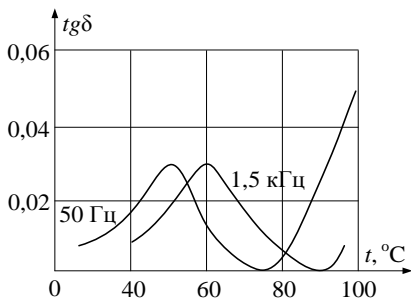


Рис.1.30. Залежність  $tg\delta = f(t)$  при різних частотах для масляно-каніфольного компаунду

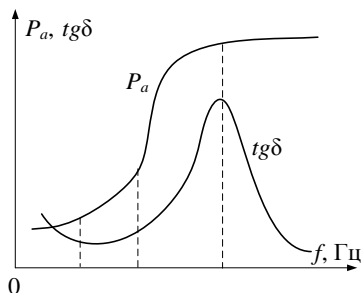


Рис.1.31. Залежність  $P_a$  і від частоти для дипольної рідини  $tg\delta$

Таким чином, характер залежності діелектричних втрат  $P_a$  від частоти не відповідає характерові частотної залежності  $tg\delta$ . Дипольно-релаксаційні втрати в малов'язких рідинах при низьких частотах незначні і можуть бути менші за втрати наскрізної електропровідності.

### 1.7.3. Діелектричні втрати в твердих діелектриках

Діелектричні втрати в твердих діелектриках необхідно розглядати у зв'язку з їх структурою. Тверді речовини володіють різноманітним складом і будовою і у них можливі всі види діелектричних втрат.

Для зручності розгляду діелектричних втрат у твердих речовинах останні можна підрозділити на чотири групи:

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

*Діелектричні втрати в діелектриках молекулярної структури* залежать від виду молекул.

У неполярних молекул і в речовинах, що не мають домішок, діелектричні втрати дуже малі. До таких діелектриків відносяться сірка, парафін, неполярні полімери – поліетилен, політетрафторетилен, полістирол та ін. Вказані речовини в зв'язку з їх малими втратами знаходять застосування як височастотні діелектрики.

Діелектрики молекулярної структури з полярними молекулами  $\epsilon$ , як правило, органічними речовинами, що широко використо-

вуються в радіотехніці. До них належать матеріали на основі целюлози (папір, картон та ін.), полярні полімери: поліметилметакрилат (органічне скло), поліаміди (капрон та ін.) і поліуретани, каучукові матеріали (ебоніт), фенолформальдегідні смоли (бакеліт та ін.), ефіри целюлози (ацетилцелюлоза та ін.) і ряд інших матеріалів. Всі вони із-за властивої їм дипольно-релаксаційної поляризації володіють великими втратами.

Втрати в цих діелектриках істотно залежать від температури. При деяких температурах спостерігаються максимум і мінімум втрат, а зростання втрат після мінімуму пояснюється збільшенням втрат наскрізної електропровідності.

*Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури* пов'язані з особливостями упаковки іонів у ґратках. У речовинах кристалічної структури з щільною упаковкою іонів при відсутності домішок, що спотворюють ґратки, діелектричні втрати досить малі.

При підвищених температурах у таких речовинах з'являються втрати від наскрізної електропровідності. До речовин цього типу відносяться кристалічні неорганічні з'єднання, що мають велике значення в сучасному виробництві електротехнічної кераміки, наприклад, корунд ( $Al_2O_3$ ), що входить до складу ультрафарфору. Прикладом з'єднань такого роду є також кам'яна сіль. До діелектриків кристалічної структури з нещільним упакуванням іонів відноситься ряд кристалічних речовин, що характеризуються релаксаційною поляризацією, що викликає підвищені діелектричні втрати.

Діелектричні втрати в аморфних речовинах іонної структури (неорганічне скло) пов'язані з явищем поляризації і наявністю електропровідності.

*Діелектричні втрати в сегнетоелектриках* вищі, ніж у звичайних діелектриків. Особливістю сегнетоелектриків є наявність у них самовільної поляризації, що проявляється в певному температурному інтервалі, аж до точки Кюрі.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках мало змінюються з температурою в області самовільної поляризації і різко падають при температурі вищій за точку Кюрі, коли сегнетоелектричні властивості втрачаються і самовільна поляризація зникає.

*Діелектричні втрати в твердих речовинах неоднорідної структури.* До твердих речовин цього типу, використовуваних як діелектрики, належать матеріали, до складу яких входить не менше двох компонентів, механічно змішаних один із одним. До неодно-

рідних діелектриків відноситься, перш за все, кераміка. Будь-який керамічний матеріал є складною багатофазною системою. У складі кераміки розрізняють кристалічну фазу, склоподібну і газову (гази у закритих порах). Діелектричні втрати у кераміці залежать від характеру кристалічної і склоподібної фаз і кількісного співвідношення між ними. Газова фаза у кераміці викликає підвищення діелектричних втрат при високих напруженостях поля унаслідок розвитку іонізації. До неоднорідних матеріалів також слід віднести слюду, що володіє шаруватою структурою.

Просочений папір слід також віднести до діелектриків неоднорідної структури. Такий папір, окрім волокон целюлози, містить просочуючу речовину того або іншого складу. Діелектричні втрати просоченого паперу визначаються електричними властивостями обох компонентів, їх кількісним співвідношенням і залишковими повітряними включеннями.

#### **1.7.4. Вплив деяких факторів на діелектричні втрати**

Розглянемо фактори, що впливають на діелектричні втрати у діелектриках. Їх є три: температура, частота, вологість.

Підвищення температури викликає ріст  $tg\delta$ , якщо втрати зумовлені провідністю, так під час нагрівання діелектрика зростає інтенсивність зміщення або переміщення зарядів. Якщо втрати зумовлені поляризацією, то при рості температури  $tg\delta$  проходить через максимум. Це пояснюється тим, що при низьких температурах в'язкість висока і втрат немає, а при високих температурах в'язкість низька і диполі зміщуються без тертя.

На рис.1.32, 1.33 показано залежності втрат від температури та частоти змінної напруги для неполярного (1) та полярного (2) та композиційного (3) діелектриків.

Збільшення частоти викликає зниження  $tg\delta$ , якщо втрати зумовлені провідністю (крива 1). В цьому випадку активна складова струму, викликана витіканням через діелектрик не змінюється зі зміною частоти, а реактивна (смісний струм) зростає пропорційно частоті. Тому відношення активного струму до реактивного зменшується, тобто  $tg\delta$  зі збільшенням частоти буде знижуватись. Якщо втрати викликані поляризацією (крива 2), то  $tg\delta$  буде мати максимум. За низьких частот втрати малі, так як швидкість повороту диполів і зміщення іонів невеликі, а звідси й малі втрати на тертя.

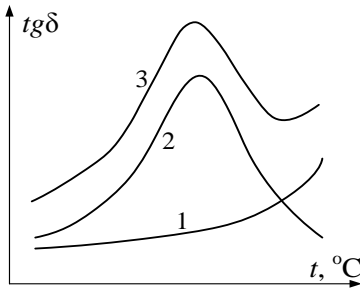


Рис.1.32. Залежність  $tg\delta = f(t)$  для однорідного (1), неоднорідного (2) та композиційного діелектриків (3)

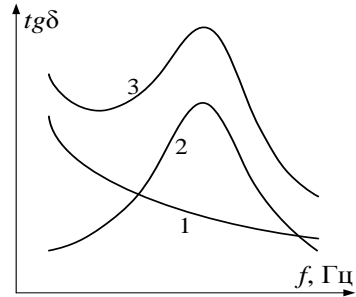


Рис.1.33. Залежність  $tg\delta = \varphi(f)$  для однорідного (1), неоднорідного (2) та композиційного діелектриків (3)

При дуже високих частотах диполі та іони не встигають повертатися або зміщуватися вслід за частотою електричного поля і тому втрати малі. У складних діелектриках (крива 3) існують втрати двох типів і  $tg\delta$  отримується шляхом сумування кривих 1 і 2.

Поява вологи в будь-якому агрегатному стані (емульсійне, молекулярно-розчинне або газоподібне) викликає ріст  $tg\delta$ . Це пояснюється тим, що у більшості діелектриків при зволоженні знижується питомий опір.

## 1.8. Пробій діелектриків

Діелектрик, знаходячись в електричному полі, втрачає властивості ізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення, що призводить до різкого росту густини струму з подальшим руйнуванням молекулярних зв'язків. Це фактично коротке замикання між електродами, що має назву пробою діелектрика або порушення його електричної міцності. Значення напруги, при якому проходить пробій, називається пробивною напругою, а відповідне значення напруженості поля – електричною міцністю діелектрика [12].

Електрична міцність діелектрика в місці пробою:

$$E_{np} = U_{np} / h, \quad (1.60)$$

де  $E_{np}$  – електрична міцність діелектрика, кВ/м,  $U_{np}$  – пробивна напруга, кВ,  $h$  – товщина діелектрика в місці пробою, м.

Пройдення струму через ізоляцію зображено на рис.1.34.

Точка  $n$  на графіку, для якої  $dI/dU \rightarrow \infty$ , відповідає пробою. Подальші явища в діелектрику після пробою визначаються характером електротехнічного матеріалу і потужністю джерела електроенергії. В місці пробою виникає дуга, що може викликати плавлення, обгорання, розтріскування або розкладення (для полімерів) як діелектрика, так і електродів. Після зняття напруги залишається слід у твердому діелектрику, у вигляді пробитого, проплавленого або пропаленого отвору. Для електричних апаратів пробій ізоляції, як правило, явище аварійного характеру, що виводить їх з ладу і потребує ремонту або заміни.

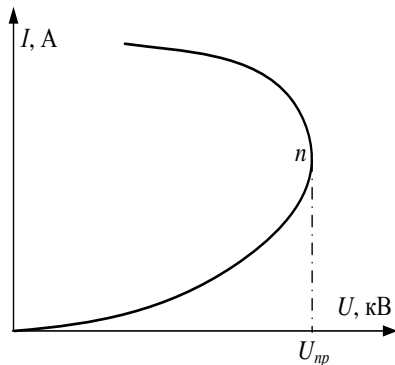


Рис. 1.34. Вольтамперна характеристика ізоляції під час пробою

Пробій газоподібних і рідких діелектриків відрізняється від пробою в твердих діелектриках тим, що в силу рухливості частинок після зняття напруги пробита ділянка ізоляції повністю відновлює свої діелектричні властивості, тобто початкове значення пробивної напруги, за умови, що довготривалість і величина електричної дуги не були такі високі, і могли б викликати необоротні зміни в діелектрику або струмопровідних частинах електротехнічних пристроїв.

Для надійної роботи діелектрика в електротехнічних установках значення робочої напруги  $U_{роб}$  повинно бути суттєво меншим від пробивної напруги  $U_{пр}$ . Відношення  $U_{роб} / U_{пр}$  називається коефіцієнтом запасу електричної міцності ізоляції.

Електрична міцність високоякісних твердих діелектриків, як правило, вища від електричної міцності рідких чи газоподібних діелектриків. Тому, якщо відстань між близькими точками електродів по поверхні твердої ізоляції ненабагато перевищує відстань по об'єму ізоляції, то за підвищення напруги в першу чергу пробивається не ізоляція, а проходить поверхневий пробій – перекриття ізоляції, тобто розряд у прилеглому до ізоляції шарі газоподібного діелектрика, наприклад повітря (перекриття фарфорових ізоляторів). Низька електрична міцність спостерігається у діелектриків з відкритими порами (дерева, паперу, неглазурованої кераміки).

### 1.8.1. Пробій газів

Зовнішньою ізоляцією у багатьох видах електротехнічних конструкцій: в трансформаторах, конденсаторах, на лініях електропередач – є повітря. Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика у порівнянні з  $E_{пр}$  більшості рідких та твердих діелектриків. Явище пробію газу залежить від ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій.

Однорідне поле можна отримати між плоскими електродами із заокругленими краями, а також між сферами при віддалі між ними, що співрозмірні з діаметром сфери. В такому полі пробій настає практично миттєво при досягненні строго визначеної напруги, що залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, яка потім переходить в дугу, якщо джерело напруги має достатню потужність. Появу іскри при заданій віддалі між електродами використовують для визначення значення прикладеної напруги (вимірювання високих напруг з допомогою шарових розрядників). При малих відстанях між електродами спостерігається значне збільшення електричної міцності повітря. Напруженість пробію газу в однорідному полі прямо пропорційна напрузі і густині газу і обернено пропорційна відстані між електродами.

Гази при великих тисках застосовують як ізоляцію для високонвольтової апаратури, зокрема у виробництві кабелів і конденсаторів. Мінімальне значення пробивних напруг для різних газів лежить у межах 280÷420 В. Для повітря мінімальна пробивна напруга складає близько 300 В.

Неоднорідне поле має місце між двома вістрями, вістрям і площиною, між проводами ліній електропередач, між сферичними поверхнями при відстані між ними, що перевищує радіус сфери і т.д. Особливістю пробію газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді корони в місцях, де напруженість поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

На рис.1.35 наведені значення пробивної і коронної напруги для повітря, що отримані під час дослідження пробію між двома паралельними проводами діаметром 8 мм при різних відстанях між ними. Як видно, при малих відстанях значення пробивної і коронної напруг близькі, але при великих відстанях поява корони передре пробію. Напруга пробію буде тим нижчою, чим вищою є ча-

стота струму. Збільшення відносної вологості повітря істотно знижує напругу пробую.

Електрична міцність газу досить сильно залежить від його густини (тобто від тиску, якщо температура постійна). При незначних змінах температури і тиску газу пробивна напруга пропорційна густині газу. В цьому випадку для розрахунків пробивних напруг використовується формула [3]:

$$U_{np} = U_{np0} \cdot \frac{0,386 \cdot P}{t + 273}, \quad (1.61)$$

де  $U_{np}$  – пробивна напруга при даному тиску і температурі;  $U_{np0}$  – пробивна напруга при нормальних тиску  $P = 0,1$  МПа і температурі  $t = 20$  °С. За нормальних умов  $U_{np} = U_{np0}$ .

На рис.1.36 наведена залежність електричної міцності газу від тиску.

При великих значеннях тиску та, відповідно, підвищеній густині газу відстань між молекулами менша, тому і довжина вільного пробігу електронів теж зменшується, і для того, щоб відбувся пробій, напруженість поля має бути збільшеною.

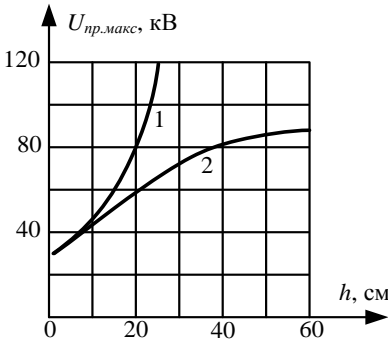


Рис.1.35. Залежність пробивної (1) і коронної (2) напруг для повітря від відстані між двома проводами

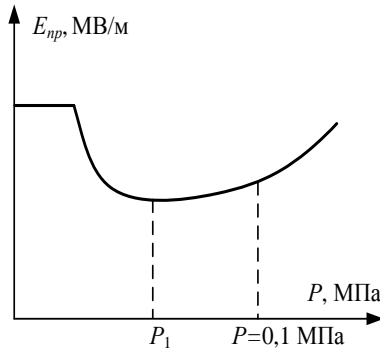


Рис.1.36. Залежність електричної міцності газу від тиску

Як видно з рис.1.36, при зменшенні тиску спочатку спостерігається падіння електричної міцності, коли тиск доходить до певної межі, нижче від атмосферного тиску, розрідження газу досягає високого ступеня і електрична міцність зростає. Це явище використовують у повітряних вимикачах. Таке зростання пояснюється зменшенням кількості молекул газу в одиниці об'єму при сильному ро-

зрідженні та, відповідно, зниженням ймовірності зіткнення електронів з молекулами. У цьому випадку електрична міцність досягає достатньо високих значень. Це явище використовують для конструювання вакуумних вимикачів. Як діелектрик повітря має такі позитивні властивості: швидко відновлює свою електричну міцність після пробою, не змінює діелектричну проникність, діелектричні втрати повітря практично дорівнюють нулю. Негативні властивості повітря як діелектрика: низька теплопровідність, низька електрична міцність, різка її зміна на поверхні твердого діелектрика ( $E_{np} = 2,19 \div 2,27$  МВ/м), здатність зволожуватись, створювати оксиди, підтримувати горіння.

Електрична міцність повітря не є постійною і залежить від його тиску, відносної вологості та ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій. Знижену у порівнянні з повітрям електричну міцність мають деякі інертні гази, що використовують для заповнення електровакуумних приладів та джерел світла. Підвищеною електричною міцністю характеризуються гази з високою молекулярною масою, такі як елегаз ( $SF_6$ ), фреон ( $CCl_2F_2$ ) у яких пробивна напруженість у 2,5 рази більша, ніж у повітря.

### 1.8.2. Пробій рідких діелектриків

Пробій рідких діелектриків проходить в результаті іонізаційних і теплових процесів. Одним з головних факторів, що сприяє пробію рідин, є наявність у них посторонніх домішок.

Рідкі діелектрики характеризуються більш високою електричною міцністю, ніж гази. Теорію електричного пробію можна застосувати до рідин, що максимально очищені від домішок. При високих значеннях напруженості електричного поля може проходити виривання електронів із металічних електродів і руйнування молекул рідини за рахунок ударів зарядженими частинками. При цьому підвищена електрична міцність рідкого діелектрика у порівнянні з газовим зумовлена значно меншою довжиною вільного пробігу електронів. Наявність води в трансформаторній оливі суттєво понижує її електричну міцність, оскільки під впливом електричного поля молекули води сильно поляризуються і, притягуючись між собою різнойменними кінцями утворюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких і проходить електричний пробій.

Особливості пробію рідких діелектриків:



- наявність домішок (води, газу, твердих частинок) знижують електричну міцність технічних рідин у порівнянні з чистими;
  - технічні рідини пробиваються внаслідок їх перегріву та закипання в місцях найбільшого скупчення домішок;
  - на умови пробою впливають рух та перерозподіл домішок, що протікають порівняно повільно, тому короточасна міцність рідких діелектриків значно вища, ніж при тривалій дії напруги;
- Зниження температури також підвищує електричну міцність із-за підвищення в'язкості рідини.

### 1.8.3. Пробій твердих діелектриків

У сучасній електрорадіотехніці використовується велика кількість видів твердих діелектриків. Серед них існують матеріали як природного походження (кварц, слюда, мармур, азбест), 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.

За фізичною природою розрізняють такі види пробою твердих діелектриків:

- 1) електричний пробій для однорідних діелектриків;
- 2) електротепловий пробій для неоднорідних діелектриків;
- 3) електромеханічний;
- 4) електрохімічний.

**Електричний пробій** однорідних діелектриків за своєю природою є чисто електронним процесом, коли з електронів у твердому тілі утворюється електронна лавина. Цей вид пробою має місце тоді, коли впливом електропровідності і діелектричними втратами знехтувано. Протікає протягом часу  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  с без виділення теплової енергії, хоча величина електричної міцності при електричному пробі до деякої міри залежить від температури. Такий вид пробою спостерігається в деяких монокристалах (молібденове скло) і в деяких органічних полімерах. В цьому випадку  $E_{np}$  досягає більш 300 МВ/м.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків характерний для технічних діелектриків, що містять газові ввімкнення. Електрична міцність твердих діелектриків практично не залежить від температури до деякого її значення. Вище цього значення спостерігається суттєве зниження електричної міцності, що говорить про появу електротеплового пробою. Низькою електричною міцні-

стю характеризуються неоднорідні діелектрики з відкритою пористістю (мармур, непросочений папір, дерево, пориста кераміка). Їх електрична міцність лежить в межах  $E_{np} = 1 \div 10$  МВ/м.

Причиною *електротеплового* пробою є руйнування твердого діелектрика під впливом тепла, що виділяється в результаті діелектричних втрат. У більшості випадків при збільшенні товщини значення електричної міцності зменшується, тобто це пояснюється погіршенням тепловідводу від внутрішньої області діелектрика, яка нагрівається більше. Тому значення напруги пробою зростає не прямо пропорційно товщині діелектрика.

Електротепловий пробій виникає у випадку, коли кількість тепла, що виділяється всередині діелектрика за рахунок діелектричних втрат, буде більшою за кількість тепла, що відводиться в навколишнє середовище. Тепловий пробій є наслідком зменшення активного опору діелектрика під впливом нагріву в електричному полі, що приводить до збільшення активного струму і подальшого нагріву діелектрика аж до його термічного руйнування.

Для розрахунку напруги електротеплового пробою твердих електроізоляційних матеріалів можна використати формулу теплової рівноваги: електрична потужність, що виділяється в діелектрику внаслідок діелектричних втрат дорівнює тепловій потужності, що відводиться від діелектрика в навколишнє середовище [3]:

$$U^2 \omega C tg\delta = \sigma S (t_1 - t_0) , \quad (1.62)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт тепловіддачі в електроди, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $S$  – площа поверхні діелектрика, м<sup>2</sup>,  $t_1$  – температура поверхні діелектрика,  $t_0$  – температура навколишнього середовища.

У стані теплової рівноваги тепловий пробій відсутній. При підвищенні температури  $tg\delta$  збільшується і, починаючи з деякої критичної температури, ліва частина рівняння стає більшою за праву, тобто тепловиділення перевищить тепловіддачу і діелектрик різко нагрівається, що призведе до його обвуглення чи розплавлення.

Звідси:

$$U_{np} = \sqrt{\frac{\sigma S (t_1 - t_0)}{\omega C tg\delta_{kp}}} , \quad (1.63)$$

де  $tg\delta_{kp}$  відповідає критичній температурі.

Цей розрахунок, придатний тільки для одновимірного потоку теплоти, називається графоаналітичним і є наближеним. Тут не враховані перепад температури по товщині діелектрика (спотворення електричного поля і підвищення градієнта напруги в поверхневих шарах), а також теплопровідність матеріалу електродів. Тому тепловий пробій часто настає при напрузі нижче розрахункової.

Для визначення пробивної напруги (кВ) при тепловому пробії користуються емпіричною формулою:

$$U_{np.эф.} = 382 \sqrt{\frac{\gamma_T}{f \cdot \varepsilon \cdot tg\delta_0 \cdot \alpha}} \cdot \varphi(c), \quad (1.64)$$

де  $\gamma_T$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу діелектрика, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $f$  – частота напруги, Гц;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність діелектрика;  $tg\delta_0$  – втрати діелектрика за температури навколишнього середовища;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат ( $TK_{tg\delta}$ );  $\varphi(c)$  – функція, значення якої для плоских зразків знаходять за рис.1.37;  $c$  – безрозмірна величина, що характеризує умови відводу тепла з діелектрика через електроди у навколишнє середовище:

$$c = \frac{\gamma_{T1} \cdot \sigma \cdot h}{2\gamma_T \cdot \gamma_{T1} + \sigma \cdot l}, \quad (1.65)$$

де  $\gamma_{T1}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу електродів Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $h$  – товщина діелектрика, м;  $l$  – товщина електрода, м.

При необмеженому зростанні  $c$  величина  $\varphi(c)$  прямує до границі, що дорівнює 0,663. Звідси, для кожного діелектрика, навіть при необмеженому збільшенні товщини ізоляції, пробивна напруга при електротепловому пробії не може бути більшою граничного значення (кВ), яке отримується з формули (1.64) при підстановці в неї  $\varphi(c) = 0,663$  [12]

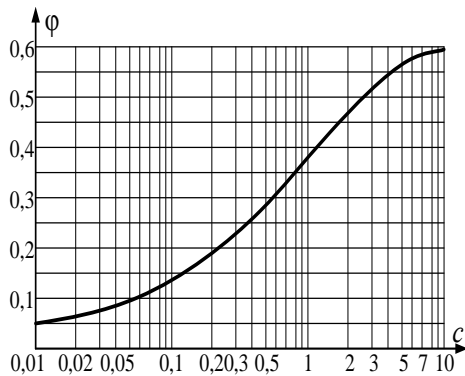


Рис.1.37. Залежність  $\varphi(c)$

$$U_{np.эф.} = 253 \sqrt{\frac{\gamma_T}{f \cdot \varepsilon \cdot tg \delta_0 \cdot \alpha}}. \quad (1.66)$$

Формула (1.66) показує, що при електротепловому пробіи пробивна напруга залежить як від частоти змінного струму, зменшуючись при зростанні  $f$ , так і від температури навколишнього середовища (початкової робочої температури діелектрика), зменшуючись при збільшенні цієї температури за рахунок збільшення  $tg \delta_0$ .

**Електромеханічний** пробій супроводжується механічним руйнуванням і утворенням мікротріщин під дією електричного поля і механічної дії електродів.

**Електрохімічний** пробій твердих діелектриків має суттєве значення при підвищених температурах і вологості повітря. Цей вид пробою спостерігається при постійній і змінній напругах низької частоти, коли в матеріалі розвиваються процеси, що викликають необоротне зменшення опору ізоляції (електрохімічне старіння). Електрохімічний вид пробою найбільш характерний для органічних діелектриків.

#### 1.8.4. Фактори, що впливають на пробій діелектриків

Розглянемо фактори, що впливають на електричну міцність діелектриків.

**Товщина ізоляції.** Будь-яка ізоляція електротехнічних пристроїв визначається відстанню між електродами. Збільшення товщини ізоляції призводить до збільшення допустимих значень напруг  $U_{np}$  і  $U_{np0,5}$ , що відповідають ймовірностям пробою при незначному і максимальному пошкодженні діелектрика. Для основних видів ізоляції високовольтних апаратів великогабаритної конструкції допустимі напруженості складають:  $E_{np} < 400$  кВ/см і  $E_{np0,5} < 200$  кВ/см. Характерний вигляд залежності напруги і розподілу напруженості від товщини ізоляції у конструкції високовольтного апарата представлені на рис. 1.38, 1.39.

Сповільнення зростання напруги в міру збільшення товщини ізоляції пов'язано зі зміною електричного поля в сторону нерівномірності або збільшенням ймовірності присутності дефектів у матеріалі. З цієї причини вводять коефіцієнт неоднорідності  $K_n$  з використанням правила максимальної напруженості, за яким в ізоляційному проміжку при будь-якій заданій ймовірності пробою або

пошкодженні ізоляції немає залежності від товщини ізоляції і коефіцієнта  $K_n$ .

Якщо максимальна напруженість в ізоляції  $E_{max} = U / h K_n$ , то із вказаного правила впливає таке співвідношення допустимих напружень для двох конструкцій з ізоляцією одного і того ж виду:

$$U_{np1} / U_{np2} = h_2 K_{n1} / h_1 K_{n2}. \quad (1.67)$$

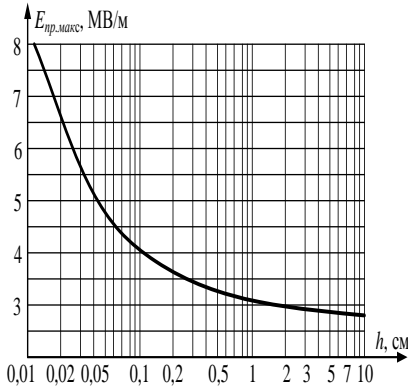


Рис.1.38. Залежність електричної міцності повітря від віддалі між електродами в однорідному полі при  $f = 50$  Гц,  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $p = 0,1$  МПа

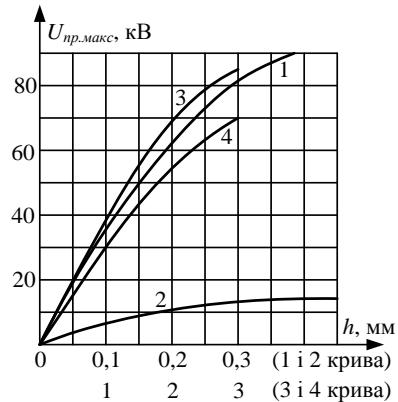


Рис.1.39. Залежність пробивної напруги від товщини при 50 Гц для електротехнічного фарфору: 1 – однорідне поле, 2 – неоднорідне поле

Задовільні результати ізоляційних конструкцій, що працюють в неоднорідному електричному полі, отримуються при  $K_n < 3$ .

**Площа електродів.** Зі збільшенням площі електродів електрична міцність зменшується. Якщо проаналізувати залежності ймовірностей пробою або пошкодження ізоляції від площі електродів, то виявиться, що напруга буде зменшуватись. Емпіричний вираз, що пов'язує допустимі напруженості для конструкцій з площами електродів відповідно  $S_1$  і  $S_2$  має вигляд:

$$\frac{U_{np1}}{U_{np2}} = 0,78 \cdot \sigma \ln \frac{S_2}{S_1}, \quad (1.68)$$

де  $S_1$  – площа електродів першої конструкції, а  $S_2 = nS_1$  ( $n > 1$ );  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення математичного сподівання напруги пробою.

## 1.9. Фізико-хімічні та механічні властивості діелектриків

При виборі ізоляційного матеріалу для певного застосування слід звертати увагу не тільки на його електричні характеристики в нормальних умовах, але й аналізувати також їх стабільність у випадках дії вологості, підвищених температур, морозу і радіації.

*Фізичні властивості* зумовлені особливостями мікроструктури: вологостійкість, термостійкість (здатність протистояти високим і низьким температурам), радіаційна стійкість (здатність протистояти різним видам випромінювань), температурні коефіцієнти лінійного розширення (для деталей, у яких контактують різні матеріали).

*Хімічні властивості* зумовлені окислюваністю поверхні, розчинністю, склеюваністю матеріалів, хіміко-біологічною стійкістю в умовах агресивного навколишнього середовища.

*Механічні властивості* зумовлені особливостями макроструктури. Сюди відносять статичну і динамічну міцність, пружність, пластичність, зносостійкість тощо. У ряді випадків до виробів висуваються вимоги стійкості до вібрацій різних амплітуд і частот.

### 1.9.1. Теплові властивості ізоляційних матеріалів

Дуже важлива властивість електричної ізоляції витримувати підвищену температуру без суттєвого погіршення її електрофізичних властивостей.

*Температура* – це поняття, введене для характеристики енергії, якою володіють молекули речовини. З іншого боку, це фізична характеристика, що відповідає рівновазі під час приведення двох тіл у контакт. Як і будь-яка фізична характеристика, вона піддається виміру. Загальноприйнятими, у даний час, є дві температурні шкали – Цельсія і Кельвіна. За шкалою Цельсія, нуль відповідає точці плавлення, а 100 °С – точці кипіння води. За шкалою Кельвіна, чи абсолютною шкалою температур, нуль відповідає абсолютному нулю, а нульова температура за шкалою Цельсія відповідає 273 К. Нижче нуля Кельвіна температури не може бути. Вона відповідає абсолютному спокою. За цієї температури, відповідно до класичної механіки, молекули й атоми абсолютно нерухомі. В наш час науковці намагаються досягти мінімуму температури в надії прояву нових властивостей матерії.

Для матеріалів вводять кілька характерних температурних точок, що вказують на працездатність і поведінку матеріалів за зміни температури.

*Теплостійкість* – температура, при якій відбувається погіршення характеристик при короткочасному її досягненні.

*Термостійкість* – температура, при якій відбуваються хімічні зміни матеріалу.

*Морозостійкість* – здатність матеріалів працювати за знижених температур.

*Точка плавлення* – температура, при якій відбувається перехід із твердого стану в рідкий. Є матеріали, в основному це термопластичні полімери, що мають точку пом'якшення, але до плавлення справа не доходить, тому що починається руйнування полімерних молекул за підвищених температур. У термореактивних полімерів навіть до пом'якшення справа не доходить, матеріал раніше починає розкладатися. У будь-яких процесах плавлення, досягнення визначеної точки є необхідною, але недостатньою умовою плавлення. Для того, щоб розплавити речовину потрібно надати їй енергію, що називається теплотою плавлення. Вона розраховується на один грам (чи на одну молекулу).

*Точка кипіння* – температура, за якої відбувається перехід з рідкого стану в пароподібний. Киплять практично всі прості речовини. Не киплять складні органічні сполуки. Вони розкладаються за більш низьких температур, не доходячи до кипіння. На точку кипіння значно впливає тиск. Так, наприклад, для води можна зрушити точку кипіння від 100 °С до 373 °С з додатковим тиском 225 атм. Є температури специфічні для електротехнічних матеріалів. Наприклад, для сегнетоелектриків вводять точку Кюрі. Виявляється, що сегнетоелектричний стан речовини виникає тільки за знижених температур. Діелектрична проникність нижче точки Кюрі велика, вона слабко наростає в міру підходу до точки Кюрі. Після досягнення цієї точки діелектрична проникність різко падає.

Наприклад, для найбільш розповсюдженого сегнетоелектрика: титанату барію, точка Кюрі становить 120 °С, для цирконат-титанату свинцю 270 °С, для деяких органічних сегнетоелектриків температура Кюрі від'ємна. Аналогічна температура (теж точка Кюрі) є й у феромагнетиків. Поведінка магнітної проникності подібна поведінці діелектричної проникності в міру підвищення температури і підходу до точки Кюрі. Єдина відмінність – спад магнітної проникності з ростом температури відбувається більш різко після досягнення точки Кюрі. Значення точки Кюрі для деяких ма-

теріалів: залізо – 770 °С, кобальт – 1330 °С, кераміка – у широкому діапазоні температур.

Електроізоляційні матеріали поділяють на сім класів ізоляції, що наведені в таблиці 1.5.

Табл.1.5.

Клас нагрівостійкості	<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
Робоча температура, °С	90	105	120	130	155	180	>180

„*Y*” – волокнисті матеріали із целюлози, бавовни, натурального шовку, непросочених і незанурених у рідкий ізоляційний матеріал, папір, картон, гума, натуральний каучук та ін.

„*A*” – ізоляція емальпроводів на масляносмоляних лаках, гетинакси, текстоліти, пластмаси з органічним наповнювачем; поліамідні плівки, поліамідні ливарні смоли (у виробках), термореактивні компаунди на основі акрилових ефірів (без наповнювачів, у виробках) і бутадієнові каучуки.

„*E*” – плівки і волокна із поліетилену, лакотканини із волокон на алкідних смолах, модифікованих оливою; матеріали на основі електрокартону, термореактивні компаунди на основі акрилових ефірів з неорганічними наповнювачами; термореактивні синтетичні смоли і компаунди (епоксидні, поліефірні, поліуретанові з відповідними затверджувачами), полікарбонатні плівки.

„*B*” – матеріали на основі щипаної слюди, слюдинітів і слюдопластів, в т.ч. з паперовою і тканинною органічною підкладкою, з в’язучими натуральними і синтетичними смолами, модифікованими рослинними оливами, ізоляція емалевих проводів на лаках, пластмаси з неорганічним наповнювачем і шарові пластики на основі скловолокнистих і азбестових матеріалів і з в’язучими термореактивними смолами, фенольноформальдегідними, епоксидними і поліефірними; термореактивні синтетичні компаунди (епоксидні і поліефірні) з мінеральними наповнювачами і затверджувачами.

„*F*” – неорганічні матеріали (слюда, скловолокно, азбест у поєднанні з органічними лаками і рідинами).

„*H*”, „*C*” – неорганічні матеріали (слюда, електрокераміка, безлужне скло, кварц), що застосовуються без в’язучих матеріалів або у поєднанні із матеріалами високої нагрівостійкості – неорганічними або елементоорганічними.



*Теплосмність* – це здатність матеріалу накопичувати теплову енергію під час нагрівання. Чисельно питома теплоємність дорівнює енергії, яку потрібно ввести в одиницю маси матеріалу, щоб нагріти його на один градус. Розмірність теплоємності [Дж/(кг·К)]. Ця величина екстенсивна, тобто можна говорити про теплоємність окремої молекули чи атома, потім просумувати кількість молекул до одного грама чи до одного моля й одержати теплоємність одного грама чи одного моля речовини. Значення теплоємності залежить від природи матеріалу.

Значення теплоємності деяких матеріалів подано в таблиці 1.6.

Табл.1.6.

Матеріал	Вода	Олива	Полімери	Алюміній	Фарфор	Кремній	Германій
Тепло- ємність, с	4200	2000	1200÷2200	950	900	700	350

Будь-які стрибки теплоємності пов'язані зі структурною перебудовою тіл, наприклад з розтягнутим плавленням таких речовин, як парафін.

Вираз для теплової енергії матеріалу:

$$Q = c \cdot m T_2 - T_1 , \quad (1.69)$$

де  $c$ ,  $m$  – питома теплоємність та маса матеріалу відповідно,  $T_1$ ,  $T_2$  – кінцева і початкова температури, К.

Цей вираз можна записати для питомих параметрів:

$$Q / V = c \cdot D T_2 - T_1 , \quad (1.70)$$

де  $Q / V$  – питома енергія (в одиниці об'єму),  $D$  – густина матеріалу.

*Теплопровідність* пояснюється тим, що тепло втрає в електротехнічних пристроях, кабелях повинно переходити в навколишнє середовище через шар ізоляції. Тепловий опір електричної ізоляції впливає на нагрів провідників і магнітопроводів. Особливо велике значення має теплопровідність порівняно товстої ізоляції у пристроях високої напруги.

Формальне визначення повної і питомої теплопровідності, повного та питомого теплового опору аналогічно до визначення повної і питомої електропровідності, повного та питомого об'ємного електричного опору. Рівняння усталеного процесу передачі тепла через тіло з повним тепловим опором  $R_T$  при різниці температур  $\Delta T$  має вигляд:

$$P = \Delta T / R_T. \quad (1.71)$$

Тут  $P$  – потужність теплового потоку, тобто кількість тепла, що проходить через матеріал за одиницю часу. Формула (1.71) аналогічна закону Ома для електричного кола, причому  $P$  грає роль струму, а  $\Delta T$  – різниці потенціалів.

Розрахунок величини теплового опору матеріалів проводиться за формулами, що аналогічні формулам для розрахунку електричного опору: наприклад, для руху тепла через ділянку матеріалу між двома паралельними одна до одної площинами – гарячої і холодної, які в свою чергу перпендикулярні до теплового потоку [12].

Для плоского шару:

$$R_T = \rho_T \cdot h / S. \quad (1.72)$$

Для циліндричного шару:

$$R_T = \frac{\rho_T \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l}. \quad (1.73)$$

Тут  $\rho_T$  – питомий тепловий опір матеріалу (м·К/Вт). Величина, обернена до питомого теплового опору, називається теплопровідністю матеріалу або коефіцієнтом теплопровідності  $\gamma_T$ .

Величина

$$A = \frac{\gamma_T}{c \cdot D} = \frac{1}{\rho_T \cdot c \cdot D}, \quad (\text{Вт} \cdot \text{м}^2 / \text{Дж}) \quad (1.74)$$

називається *температуропровідністю* і виражається у відповідних похідних одиницях.

### 1.9.2. Вологісні властивості діелектриків

Електрорадіоматеріали в тій чи іншій мірі є гігроскопічними, тобто здатні вбирати в себе вологу з навколишнього середовища, і вологопроникними, тобто здатні пропускати крізь себе пари води. Атмосферне повітря завжди містить деяку кількість водяної пари.

Абсолютну вологість повітря оцінюють масою  $m$  водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря. Кожній температурі відповідає певне значення абсолютної вологості при насиченні  $m_{нас}$ . Абсолютна вологість різко зростає зі збільшенням температури,

тобто росте і тиск водяної пари. Відносну вологість повітря визначають у відсотках з відношення:

$$\varphi = \frac{m}{m_{нас}} \cdot 100\%. \quad (1.75)$$

Вода є сильнополярним діелектриком з низьким питомим опором ( $\rho = 10^3 \div 10^4$  Ом·м), а тому її проникання в пори твердих діелектриків веде до різкого зниження їх електричних властивостей. Особливо помітний вплив вологості при підвищених температурах (30÷40 °С) і відносній вологості 98÷100 %. Подібні умови негативно позначаються на експлуатаційних характеристиках електрорадіоматеріалів.

В першу чергу підвищена вологість повітря впливає на поверхневий опір діелектриків. При наявності в діелектрику відкритої пористості волага потрапляє всередину матеріалу. Для захисту твердих діелектриків від дії вологості їх покривають лаками, що не змочуються водою.

За нормальну вологість повітря (для різних випробувань, для визначення властивостей гігроскопічних матеріалів у стандартних умовах зволоження) приймають відносну вологість повітря  $\varphi = 65\%$ . У повітрі з нормальною вологістю при 20 °С вміст водяної пари  $m = 11,25$  г/м<sup>3</sup>.

Зразок електроізоляційного матеріалу, поміщений в умови певної вологості і температури навколишнього середовища, через деякий час досягає деякого рівноважного стану вологості. Якщо порівняно сухий зразок матеріалу буде поміщений у вологе повітря (з відносною вологістю  $\varphi$ ), то можна спостерігати поступове поглинання матеріалом вологи з повітря, причому вологість матеріалу, тобто вміст вологи в одиниці маси матеріалу, протягом часу підвищуватиметься, наближаючись до рівноважної вологості  $\varphi_p$ , відповідною заданому значенню  $\varphi$  (рис.1.40 крива 1). Навпаки, якщо в повітрі тієї ж відносної вологості  $\varphi$  буде поміщений зразок того ж матеріалу з початковою вологістю, більшою  $\varphi_p$ , то вологість зразка зменшуватиметься, наближаючись до значення рівноважної вологості, в цьому випадку відбувається сушіння матеріалу (рис.1.40 крива 2). Для різних матеріалів значення рівноважної вологості при одному і тому ж значенні відносної вологості повітря  $\varphi$  можуть суттєво відрізнитись.

На гігроскопічність матеріалу істотний вплив робить будова і хімічна природа. Велику роль грають наявність і розмір капілярних проміжків усередині матеріалу, в які проникає волога. Сильно ж пористі матеріали, зокрема волокнисті, більш гігроскопічні, ніж матеріали щільної будови. Для зменшення гігроскопічності пористих ізоляційних матеріалів широко застосовується їх просочення.

Найбільш помітне зниження питомого об'ємного опору під впливом вологості спостерігається у пористих матеріалів, що містять розчинні у воді домішки, які утворюють електроліти з високою питомою провідністю. Для подібних матеріалів залежність питомого опору вологого зразка від температури наведена на рис.1.41.

При змінній напрузі найбільш чутливим параметром пористих діелектриків є  $tg\delta$ , що помітно зростає зі зволоженням матеріалу. Менш чутлива величина  $\epsilon$ , проте і вона, як правило, збільшується з поглинанням вологи, зважаючи на велике значення діелектричної проникності води у порівнянні з іншими діелектриками (для води  $\epsilon \approx 80$ ). Тому в ряді випадків про гігроскопічність матеріалу судять по збільшенню електричної ємності зразка під дією вологості.

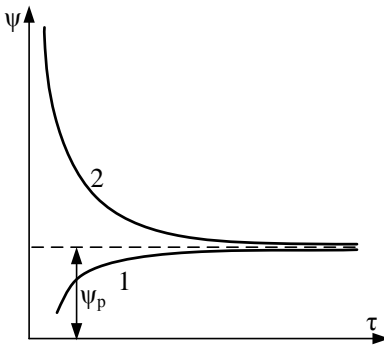


Рис.1.40. Зміна вологості  $\psi$  зразка матеріалу при зволоженні і сушінні для постійних відносної вологості навколишнього повітря і температури

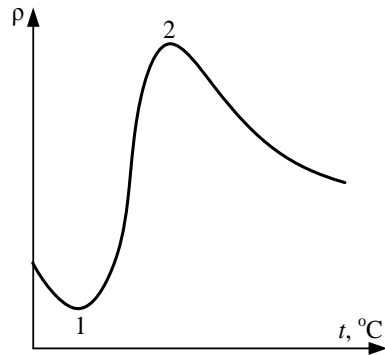


Рис.1.41. Залежність питомого об'ємного опору вологого зразка матеріалу від температури

При нагріванні вологого зразка питомий опір  $\rho$  спочатку падає за рахунок збільшення ступеня дисоціації домішок у водному розчині (до точки 1), потім йде видалення вологи – сушіння (ділянка 1-2) і лише при вищих температурах спостерігається зниження  $\rho$ .

### 1.9.3. Механічні властивості діелектриків

Електрорадіоматеріали, з яких виготовлені елементи конструкцій, піддаються впливу механічних навантажень і тому практичне значення має механічна міцність цих матеріалів, а також їхня здатність не деформуватися від механічних напружень.

**Міцність.** Найпростіші види статичних механічних навантажень – розтягуючих, стискуючих і згинальних вивчаються на підставі елементарних закономірностей, відомих з курсу опору матеріалів. Значення границь міцності при розтягуванні ( $\sigma_p$ ), стиску ( $\sigma_c$ ) і згині ( $\sigma_z$ ) у системі одиниць СІ виражаються у Паскалях (Н/м<sup>2</sup>).

Для електроізоляційних матеріалів анізотропної будови (шаруватих, волокнистих) значення механічної міцності сильно залежить від напрямку прикладення навантаження. Важливо відзначити, що для ряду діелектриків (скла, керамічних матеріалів, багатьох пластмас та ін.) межа міцності при стиску значно більша, ніж при розриві або згині. Так, наприклад, у кварцевого скла при стискуючих напруженостях можна одержати  $\sigma_c$  – 200 МПа, а при розтягуванні  $\sigma_p$  – до 50 МПа.

Механічна міцність ряду діелектриків сильно залежить від площі поперечного перерізу виробів і від температури. Механічна міцність полімерних матеріалів суттєво зменшується з підвищенням температури. Міцність гігроскопічних матеріалів знижується при збільшенні вологості. Велике практичне значення мають крихкість, твердість і деякі інші механічні характеристики електроізоляційних матеріалів.

**Крихкість.** Багато матеріалів крихкі, тобто, маючи порівняно високу міцність стосовно статичних навантажень, у той же час легко руйнуються динамічними, раптово прикладеними зусиллями. У ряді випадків перевіряють здатність електроізоляційних матеріалів витримувати без руйнування тривалий вплив вібрацій, тобто повторних коливань певної частоти й амплітуди.

**Твердість.** Твердість, тобто здатність поверхневого шару матеріалу протистояти деформації від стискуючого зусилля має для діелектриків менш істотне значення і визначається різними методами: для неорганічних матеріалів – за мінералогічною шкалою Мооса, для органічних діелектриків – за способом Брінелля або за допомогою маятника Кузнецова.

**В'язкість.** Для рідких і напіврідких електроізоляційних матеріалів, олів, лаків, заливочних і просочувальних компаундів ва-

жливою механічною характеристикою є в'язкість. Динамічна в'язкість або коефіцієнт внутрішнього тертя, рідини представляє собою величину, що входить у цілий ряд законів гідродинаміки в'язких середовищ, а саме в закон витікання в'язких рідин через капілярні трубки, у закон руху кульки у в'язкому середовищі під дією невеликої постійної сили. В'язкість усіх речовин, які не піддаються при нагріванні хімічним змінам, сильно зменшується з підвищенням температури.

#### **1.9.4. Хімічні властивості діелектриків**

Знання хімічних властивостей діелектриків важливе для оцінки надійності їх в експлуатації і для розробки технології. При тривалій роботі діелектрики повинні не руйнуватися, не виділяючи побічні продукти і не викликати корозії дотичних з ними металів; не реагувати з різними речовинами (наприклад, газами, водою, кислотами, лугами, розчинами солей тощо). Стійкість до дії всіх цих речовин у різних діелектриків досить різноманітна.

Матеріали у виробництві деталей можуть оброблятися різними хіміко-технологічними способами: склеюватися, розчинятися у розчинниках з утворенням лаків і т.д. Розчинність твердих матеріалів може бути оцінена кількістю матеріалу, що переходить у розчин за одиницю часу з одиниці поверхні матеріалу, дотичної з розчинником. Крім того, нерідко оцінюють розчинність за найбільшою кількістю речовини, яка може бути розчинена в даному розчині (тобто за концентрацією насиченого розчину). Дипольні речовини легше розчиняються в дипольних рідинах, нейтральні – в нейтральних. Так, неполярні або слабополярні вуглеводні (парафін, каучук) легко розчиняються у рідких вуглеводнях, наприклад в бензині; полярні смоли, що містять гідроксильні групи (фенолформальдегідні та інші смоли), розчиняються у спирті та інших полярних розчинниках. При підвищенні температури розчинність різко збільшується.

Стійкість електроізоляційних матеріалів до корозії при взаємодії з різними хімічно активними речовинами (газами, водою, кислотами, лужними і сольовими розчинами тощо) досить різноманітна. При визначенні хімічної стійкості зразки матеріалів на тривалий час поміщають в умови, що близькі до експлуатаційних. Стійкість матеріалів до радіаційного впливу визначається як здатність працювати в умовах інтенсивного опромінення або після радіацій-

ного впливу при збереженні основних властивостей. Не менш важливим є радіаційний вплив на матеріали з метою отримання іншої структури, надання їм нових властивостей (радіаційна обробка полімерів, легування напівпровідників, зміна прозорості скла тощо). Електромагнітне випромінювання (рентгенівське і гамма), важкі заряджені частинки (протони, альфа-частинки) і нейтрони поглинаються речовиною, утворюючи різного роду радіаційні дефекти. Кількість дефектів, а отже, і радіаційні ефекти, з часом накопичуються. Тому радіаційна стійкість визначається сумарною (інтегральною) дозою випромінювання, що поглинається речовиною.

Світлові і особливо ультрафіолетові промені можуть чинити певну дію на діелектрики і напівпровідники, викликаючи фотопровідність, а також прискорюють старіння ряду органічних матеріалів (нафтова олива, гума, капрон). Під дією світлового опромінення деякі матеріали втрачають механічну міцність і еластичність, внаслідок чого в них з'являються тріщини. Наприклад, лакові покриття відстають від основи. Здатність матеріалів зберігати свої експлуатаційні характеристики під дією світлового випромінювання називають світлостійкістю.

### 1.9.5. Оптичні властивості діелектриків

Великий інтерес для практичного використання в електроніці та оптичному зв'язку викликають оптичні явища, що відбуваються в діелектриках. Розглянемо більш детально деякі оптичні явища, без яких принцип роботи багатьох приладів є неможливим.

Основним матеріалом для виготовлення оптичних волокон є чистий плавлений кварц  $SiO_2$ , показник заломлення якого може бути зменшений шляхом додавання домішок фтору  $F$  або оксиду бору  $B_2O_3$ , або збільшений за рахунок введення домішок оксиду германію  $GeO_2$ , фосфорного ангідриду  $P_2O_5$  та ін.

Експериментальні результати з вимірювання показника заломлення  $n$  від довжини хвилі  $\lambda$  в об'ємних зразках компонентного скла на основі кварцу з високою точністю апроксимуються в діапазоні оптичної прозорості діелектрика тричленної формулою Селмейера [5]:

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i}, \quad (1.76)$$

де  $A_i, l_i$  – коефіцієнти Селмейєра, що є постійними для даного діелектрика величинами і знаходяться підгонкою вимірних значень показників заломлення об’ємного зразка скла. Можна знайти спектральні залежності показника заломлення в об’ємному кварцовому склі з певною концентрацією різних легуючих домішок при використанні інтерполяційних многочленів Селмейєра як функції мольної концентрації домішки. За вузлові точки інтерполяції беруться експериментально знайдені значення цих коефіцієнтів для відомих концентрацій обраної домішки.

Так, наприклад, для довжини хвилі  $\lambda = 0,8$  мкм показник заломлення для скла дорівнює:  $n = 1,453$  (100%  $SiO_2$ );  $n = 1,458$  (3,1%  $GeO_2$ , 96,9%  $SiO_2$ );  $n = 1,466$  (7,9%  $GeO_2$ , 92,1%  $SiO_2$ );  $n = 1,475$  (13,5%  $GeO_2$ , 86,5%  $SiO_2$ ). Звідси видно, що при збільшенні концентрації оксиду германію  $GeO_2$  показник заломлення збільшується. Якщо необхідно зменшити показник заломлення, то необхідно додати домішки фтору  $F$ , тоді  $n = 1,449$  (1%  $F$ , 99%  $SiO_2$ ) або домішки оксиду бору  $B_2O_3$ , тоді  $n = 1,448$  (13,3%  $B_2O_3$ , 86,7%  $SiO_2$ ).

Таким чином, впливаючи на властивості матеріалу шляхом додавання різних домішок, можна керувати його оптичними характеристиками.

Середовище є дисперсним, якщо показник заломлення залежить від частоти хвилі, тобто  $n = f(\omega)$ . Показник заломлення  $n$  в даній точці середовища дорівнює значенню відношення швидкості світла у вакуумі до фазової швидкості монохроматичної плоскої електромагнітної хвилі

$$n = \frac{c}{v_\phi} = \frac{\beta}{k}, \quad (1.77)$$

де  $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число у вакуумі.

Діапазон частот, в якому показник заломлення зростає з ростом частоти хвилі, називається ділянкою з нормальною дисперсією середовища. Наприклад, нормальна дисперсія спостерігається у речовинах, прозорих для світла, коли втрати енергії світлової хвилі незначні. У лініях оптичного зв’язку, при використанні скла на базі плавленого кварцу, працює діапазон довжин хвиль ближнього і середнього інфрачервоного діапазону. У цьому випадку показник заломлення повільно і монотонно зростає з ростом частоти



або зменшується з ростом довжини хвилі  $\lambda$ . Таке скло має нормальну дисперсію показника заломлення.

Дисперсія середовища називається аномальною, якщо із зростанням частоти хвилі показник заломлення зменшується. Аномальна дисперсія спостерігається в областях, які відповідають вузьким смугам інтенсивного поглинання світла в даному середовищі. Наприклад, для звичайних стекел ці смуги знаходяться в інфрачервоному та ультрафіолетовому ділянках спектра оптичного випромінювання.

Якщо світло поширюється із середовища з більшим показником заломлення  $n_1$  (оптична густина більша) в середовище з меншим показником заломлення  $n_2$  (оптична густина менша), наприклад, зі скла у воду, то згідно закону Снелліуса:

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{n_2}{n_1} > 1 \quad (1.78)$$

заломлений промінь віддаляється від нормалі і кут заломлення  $\alpha_2$  більший, ніж кут падіння  $\alpha_1$ .

Зі збільшенням кута падіння збільшується кут заломлення до тих пір, доки при деякому куті падіння ( $\alpha_1 = \alpha_{cp}$ ) кут заломлення не буде дорівнювати  $\pi/2$ . Кут  $\alpha_{cp}$  називається граничним кутом. При кутах падіння  $\alpha_1 > \alpha_{cp}$  все падаюче світло повністю відбивається від поверхні розділу середовищ.

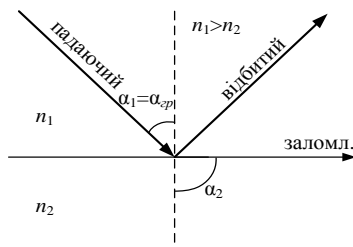


Рис. 1.42. Повне внутрішнє відбивання променя при  $\alpha_1 = \alpha_{cp}$

У міру наближення кута падіння до граничного кута, інтенсивність заломленого променя зменшується, а відбитого зростає. Якщо  $\alpha_1 = \alpha_{cp}$ , то інтенсивність заломленого променя перетворюється в нуль, а інтенсивність відбитого променя дорівнює інтенсивності падаючого (рис. 1.42).

Зі збільшенням кута падіння збільшується кут заломлення до тих пір, доки при деякому куті падіння ( $\alpha_1 = \alpha_{cp}$ ) кут заломлення не буде дорівнювати  $\pi/2$ . Кут  $\alpha_{cp}$  називається граничним кутом. При кутах падіння  $\alpha_1 > \alpha_{cp}$  все падаюче світло повністю відбивається від поверхні розділу середовищ. У міру наближення кута падіння до граничного кута, інтенсивність заломленого променя зменшується,

а відбитого зростає. Якщо  $\alpha_1 = \alpha_{cp}$ , то інтенсивність заломленого променя перетворюється в нуль, а інтенсивність відбитого променя дорівнює інтенсивності падаючого (рис.1.42). Таким чином, при кутах падіння від  $\alpha_{cp}$  до  $\pi/2$  промінь не заломлюється, а повністю відбивається в перше середовище, причому інтенсивність падаючого і відбитого променя однакові. Це явище називається повним внутрішнім відображенням.

Граничний кут  $\alpha_{cp}$  визначимо з формули Снелліуса при підтановці в неї  $\alpha_2 = \pi/2$ . Тоді

$$\sin \alpha_{cp} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (1.79)$$

Це рівняння задовольняє значенням кута  $\alpha_{cp}$  при  $n_2 \leq n_1$ . Явище повного внутрішнього відображення використовується у волоконній оптиці (світловодах), у рефрактометрах (дає змогу знайти показник заломлення тіл) і т. д.

**Поглинання світла.** Поглинанням світла називається явище втрати енергії світлової хвилі, що проходить через речовину, внаслідок перетворення енергії в інші форми, зокрема в теплову. У результаті поглинання інтенсивність світла при проходженні через речовину зменшується. Поглинання світла в речовині описується законом Бугера [5]:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (1.80)$$

де  $I_0$  і  $I$  – інтенсивності плоскої монохроматичної хвилі на вході і на виході шару поглинаючої речовини товщиною  $x$ ,  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання, що залежить від довжини хвилі світла, хімічної природи, стану речовини і не залежить від інтенсивності світла.

Коефіцієнт поглинання для діелектриків невеликий і лежить у межах  $10^{-3} \div 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ , проте у них спостерігається селективне поглинання світла у визначених інтервалах довжин хвиль, коли  $\alpha$  різко зростає, і спостерігаються порівняно широкі смуги поглинання, що пов'язано з явищем резонансу електронів в атомах діелектрика.

**Поляризація світла.** Поляризація світла – це фізична характеристика оптичного випромінювання, що описує світлову анізотропію електромагнітних хвиль, тобто нееквівалентність різних напрямків у площині, перпендикулярній світловому променю. Поперечність електромагнітної хвилі позбавляє її осової симетрії щодо напрямку її поширення через наявність виділених напрямів (вектора

$\vec{E}$  – напруженості електричного поля, вектора  $\vec{H}$  – напруженості магнітного поля) у площині, перпендикулярній напрямку вектора швидкості хвилі. Всі типи поляризації світла можна розглянути на прикладі монохроматичної електромагнітної хвилі, вектори  $\vec{E}$  і  $\vec{H}$  якої змінюються уздовж осей  $x$  і  $y$  за гармонійним законом.

Розглянемо поляризацію електричної складової електромагнітної хвилі. Якщо різниця фаз компонентів  $\vec{E}$  дорівнює нулю, отримаємо стабільні годографи  $\vec{E}$ , які можуть мати вигляд, зображений на рис.1.43.

Світло, що несе однакову енергію у хвилі з довільною орієнтацією вектора  $\vec{E}$ , називається природним або неполяризованим світлом. Таке світло випромінюють нагріті тіла.

Світло, що несе різну енергію у хвилі з хаотичною орієнтацією  $\vec{E}$ , називають частково поляризованим. Частково поляризоване світло можна представити як накладення неполяризованого світла на повністю поляризоване світло. Нижче годографів показані умовні позначення відповідних хвиль на променях.

Він характеризується коефіцієнтом поляризації:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (1.81)$$

де  $I_{max}$  – інтенсивність світла у хвилі, що несе найбільшу енергію;  $I_{min}$  – у хвилі, що несе найменшу енергію. Для випадку а) і б)  $P = 1$ ; для випадку в)  $P = 0$ ; для випадку г)  $0 < P < 1$ .

Поляризацію світла прийнято називати правою, якщо вектор  $\vec{E}$  здійснює обертання за годинниковою стрілкою при спостереженні назустріч світловому променю, і лівій – якщо вектор  $\vec{E}$  здійснює обертання проти годинникової стрілки.

Для поляризації природного світла використовуються спеціальні пристрої – поляризатори. Поляризатори – це оптичні пристрої, які при освітленні будь-яким світлом пропускають без ослаблення тільки повністю поляризоване світло, площина поляризації якого збігається з головною площиною поляризатора. Пройшовши через поляризатор світло підкоряється закону Малюса [5]

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (1.82)$$

де  $I_0$  – інтенсивність падаючого лінійно поляризованого світла,  $I$  – інтенсивність лінійно поляризованого світла після проходження поляризатора,  $\varphi$  – кут між площиною поляризації падаючої хвилі і головною площиною поляризатора.

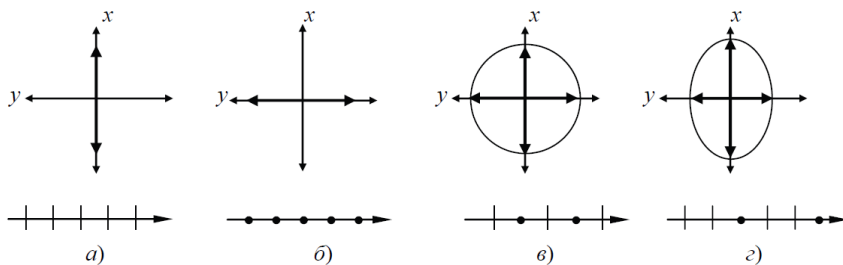


Рис.1.43. Годографи: а) світло, повністю поляризоване у вертикальній площині; б) світло, повністю поляризоване в горизонтальній площині; в) природне (неполяризоване) світло; з) світло, частково поляризоване у вертикальній площині

Природне світло, що пройшло через поляризатор, стає лінійно поляризованим (площина його поляризації збігається з головною площиною поляризатора), а його інтенсивність зменшується у два рази, так як середнє значення квадрата косинуса для кутів у межах  $360^\circ$  дорівнює 0,5.

## 1.10. Контроль за якістю ізоляції

Якість технічної ізоляції визначається не тільки культурою виробництва, а й службою контролю чи перевірки відповідності якості ізоляції ДЕСТу або заводським нормам. Контроль за якістю ізоляції на виробництві при виготовленні і випуску електротехнічного обладнання та профілактика ізоляції в експлуатації спрямовані на виявлення її дефектів з наступною заміною або відновленням пошкодженої ізоляційної ділянки.

### 1.10.1. Електричне старіння ізоляції

Тривала дія робочої напруги електротехнічних пристроїв визначає здатність їх ізоляції витримати вплив багатьох чинників за час всього терміну експлуатації і чисельно оцінюється електричною міцністю через 20÷30 років шляхом випробування ізоляції підвищеною напругою з частотою 50 Гц протягом 1 хв. Тривала екс-

платуація ізоляції призводить до її старіння, зниження електричної міцності та погіршення електричних характеристик (діелектричної проникності і втрат). Причинами зміни цих характеристик є: електричне старіння внаслідок розвитку часткових розрядів при перенапругах; теплове старіння і окислення ізоляції; зволоження ізоляції, а також причини механічного характеру (електродинамічні зусилля при коротких замиканнях, вібрації тощо); хімічне старіння або електролітичне окислення.

У органічних діелектриках часткові розряди викликають виділення водню або інших газів (метан, ацетилен, вуглекислий газ та ін.), а також вуглецевих з'єднань зі значною провідністю (дендрити, ерозія або вуглекислі освіти по поверхні керамічної, порцелянової або скляної ізоляції). У багатьох випадках явище часткових розрядів може викликати мікротріщини в діелектрику.

Старіння паперової ізоляції проявляється у зміні електричних і фізико-хімічних характеристик, як мінеральної оливи, так і паперу або електрокартону. При цьому провідність і діелектричні втрати збільшуються, надалі старіння завершується електричним або тепловим пробоем ізоляції. Газовиділення в оливі пов'язано з дією сильного електричного поля, достатнього, щоб вільні електрони зруйнували молекулу вуглецю з розчепленням атому водню. Інтенсивність газовиділення при наявності часткових розрядів або при його відсутності залежить від хімічного складу оливи, та ступеня його очистки.

### **1.10.2. Вплив температури на якість ізоляції електротехнічних пристроїв**

Вирішальним фактором при розрахунку та правильному виборі електротехнічних пристроїв (електричного двигуна, трансформатора, реле і т.д.) є їх нагрів.

Найбільш уразливою з точки зору нагріву є ізоляція обмоток електричних машин. Вказані робочі температури для кожного класу ізоляції встановлені, виходячи із терміну роботи електродвигунів 15÷20 років при номінальному навантаженні. При збільшенні температури на 25% номінальний термін роботи скорочується до 1,5 місяця, а при збільшенні температурного навантаження на 50% двигун виходить з ладу через 3 години. Навантажувальна здатність електричних машин визначається умовами нагріву, оскі-

льки температура є головною причиною, що обмежує потужність машини під час тривалих і короточасних навантажень.

Процеси нагріву та охолодження у всіх типах електричних машин підпорядковані загальним законам, оскільки електричну машину можна в першому наближенні розглядати як однорідне тверде тіло. Незважаючи на складний характер розподілу тепла в електричній машині, заміна реальної машини однорідним тілом дає можливість встановити деякі загальні закономірності зміни температури машини у процесі нагріву і охолодження.

Втрати енергії, що виникають у машині, виділяються у вигляді тепла, яке підвищує температуру обмоток і магнітопроводу. За проміжок часу  $dt$  в електричній машині виділяється теплова енергія  $dQ = \Delta P dt$ , яка витрачається на підвищення температури на величину  $d\Theta$  і частково відводиться у навколишнє середовище. У будь-який момент часу в електричній машині має місце баланс теплової енергії, що виражається рівнянням:

$$dQ = \Delta P \cdot dt = cmd\Theta + k_{me} S_{ox} \Theta dt, \quad (1.83)$$

$cmd\Theta$  – частина теплової енергії, що накопичується у машині і призводить до підвищення її температури;  $k_{me} S_{ox} \Theta dt$  – частина теплової енергії, що розсіюється у навколишнє середовище;  $c$  – питома теплоємність машини (кількість тепла, що викликає підвищення температури 1 кг маси машини на  $1^\circ\text{C}$ );  $m$  – маса машини, кг;  $k_{me}$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні (кількість тепла, що розсіюється з  $1\text{m}^2$  поверхні охолодження машини протягом 1с при різниці температур в  $1^\circ\text{C}$ ), який визначає інтенсивність охолодження електричної машини;  $S_{ox}$  – поверхня охолодження машини;  $\Theta$  – перевищення температури машини над температурою навколишнього середовища.

За деякої температури  $\Theta_\infty$  настає усталений процес, при якому все виділене в машині тепло віддається навколишньому середовищу. В цьому випадку величина  $cmd\Theta = 0$  і рівняння балансу матиме вигляд:

$$\Delta P \cdot dt = k_{TB} S_{OX} \Theta_\infty dt. \quad (1.84)$$

Величину  $\Theta_\infty$  називають усталеним перевищенням температури:

$$\Theta_{\infty} = \frac{\Delta P}{k_{me} S_{ox}}. \quad (1.85)$$

Рівняння теплового балансу) можна записати у вигляді

$$k_{me} S_{ox} \Theta_{\infty} - \Theta \, dt = cmd\Theta. \quad (1.86)$$

Розв'язком диференціального рівняння (1.86) за умови, що при  $t = 0$  електрична машина вже мала деяке перевищення температури  $\Theta_0$  над навколишнім середовищем, буде:

$$\Theta = \Theta_{\infty} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \Theta_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1.87)$$

де  $T = \frac{cm}{k_{me} S_{ox}}$  – стала часу нагріву.

Із (1.87) випливає, що величина  $\Theta$  у процесі нагрівання і охолодження змінюється за експоненціальним законом. При нагріванні  $\Theta$  зростає (рис.1.44, а крива 1), асимптотично наближаючись до усталеного значення  $\Theta_{\infty 1}$ . Під час охолодження температура  $\Theta$  зменшується (рис.1.44, а крива 2) до усталеної величини  $\Theta_{\infty 2}$ . У початковій точці  $\Theta_0$  при  $t = 0$  похідна  $\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_{\infty} - \Theta_0}{T}$ . Отже, сталу часу  $T$  можна представити у вигляді відрізка  $AB$ , що відсікає дотична, проведена до кривої нагріву у початку координат, на прямій, що відповідає усталеному перевищенню температури  $\Theta_{\infty}$ .

Якщо машину ввімкнути після відносно довгого перебування у вимкненому стані, то рівняння нагріву матиме вигляд:

$$\Theta = \Theta_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (1.88)$$

Коли ж машина вимикається з мережі, то відбувається її охолодження до температури навколишнього середовища за експоненціальним законом:

$$\Theta = \Theta_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1.89)$$

де  $T_{\infty}$  – температура нагрітої машини.

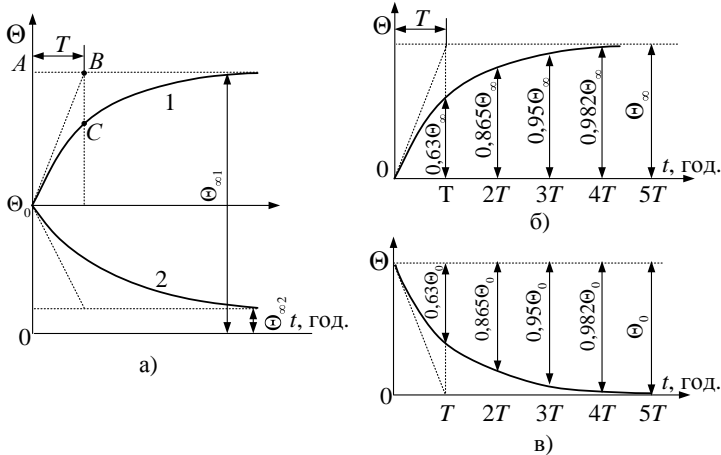


Рис.1.44. Криві нагріву та охолодження електричних машин

Для електричних машин різних потужностей величина  $T = (0,3 \div 2)$  години, для мікромашин  $T = (3 \div 10)$  хвилин.

У процесі роботи електричної машини відбуваються необоротні зміни ізоляції, які називають старінням ізоляції. У першу чергу змінюються механічні властивості ізоляції, вона стає крихкою і утворюються тріщини, що понижують її електричну міцність.

Також головною причиною старіння ізоляції є температура. Висока температура викликає окислення складових частин ізоляції. Тому для забезпечення заданого терміну служби електричних машин температура нагріву окремих її частин повинна бути обмежена. Експериментальні дослідження показали, що термін служби ізоляції в роках може визначатись за формулою:

$$t_{із} = K \cdot e^{-\alpha\Theta}, \quad (1.90)$$

де  $K$  і  $\alpha$  – коефіцієнти, що залежать від класу ізоляції;  $\Theta$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

З цієї формули випливає, що із збільшенням температури різко скорочується термін служби ізоляції. Наприклад, для ізоляції класу  $A$  ( $\alpha = 0,088$ ,  $K = 71500$ ) за температури  $95^{\circ}\text{C}$  термін служби ізоляції  $t_{із} = 16$  років; за  $T = 110^{\circ}\text{C}$  термін служби ізоляції скорочується до декількох днів. Для орієнтовних розрахунків приймають, що підвищення температури приблизно на  $10^{\circ}\text{C}$  знижує термін служби ізоляції класу  $A$  у два рази.



### 1.10.3. Визначення температурного режиму обмоток

Одним з критеріїв оцінки технічного стану обмоток і деталей електричних машин є згаданий температурний режим їх роботи. Порушення цього режиму звичайно призводить до різкого зниження строку служби або до виходу електрообладнання з ладу.

Перегрівання окремих місць станини електричних машин змінного струму свідчить про наявність міжвиткового замикання обмоток, а в електричних машинах постійного струму – про замикання обмоток на корпус у двох місцях. Загальне перегрівання обмоток електричних машин може свідчити про перевантаження, неправильне їх сполучення, про міжвиткові замикання, несправність вентиляційних систем (пошкодження вентиляторів, забруднення вентиляційних каналів) тощо.

Середню температуру обмоток електричних машин визначають за їх опором постійному струму. Опір вимірюють в холодному стані обмоток і після їх нагрівання. При цьому приймається, що температура холодної обмотки дорівнює температурі повітря, яке оточує електричну машину. Середню температуру нагрітих мідних обмоток електричних машин і апаратів обчислюють за формулою:

$$\Theta = \frac{R_n - R_x}{R_x} (235 + \Theta_x) + \Theta_x, \quad (1.91)$$

де  $R_n$ ,  $R_x$  – опір обмотки відповідно у нагрітому і холодному стані, Ом;  $\Theta_x$  – температура обмотки в холодному стані, °С. Якщо обмотка виготовлена з алюмінію, то у формулі число 235 замінюється на 245.

Гранично допустимі значення перевищення температури обмоток, деталей і вузлів електричних машин нормуються залежно від класу нагрівостійкості ізоляційного матеріалу.

### 1.10.4. Дефекти і пошкодження ізоляції обмоток

У ізоляційних конструкціях розрізняють місцеві і загальні дефекти.

Місцеві дефекти зосереджені на невеликій ділянці ізоляції та проявляються у вигляді газових і металевих ввімкнень, домішок, а також у вигляді механічних і технологічних порушень (мікротріщин, зсувів шарів стрічки, вм'ятин тощо).

Загальні дефекти найбільш поширені. Серед них частіше проявляється проникаюча волога в ізоляцію, рідше проявляються дефекти розвиненого газового ввімкнення і провідної домішки.

На обмотки й особливо на їх ізоляцію у процесі експлуатації діють електромагнітні сили, вібрація, температура, навколишнє середовище та інші фактори. Спільна дія цих факторів призводить до незворотних процесів зміни структури і хімічного складу ізоляції, тобто до старіння ізоляції. Крім цього, в ізоляції можуть бути дефекти, які виникають як у процесі виготовлення матеріалів, так і під час виготовлення самої ізоляційної конструкції.

Особливо часто під час вкладання обмоток пошкоджується виткова ізоляція, що значно скорочує термін їх служби. Використання під час вкладання обмоток металевго інструмента часто призводить до передавлювання і прорізання ізоляційного шару проводів. Різкі перегини обмоткового проводу при намотці сприяють утворенню в ізоляції значних механічних напруг, внаслідок чого виникають тріщини. Розвиток місцевих дефектів звичайно призводить до пошкодження ізоляційних конструкцій в перший період експлуатації. Такі пошкодження виникають, як правило у разі пробою міжвиткової ізоляції.

У процесі роботи на обмотки електричних машин діють електродинамічні і механічні сили, які досягають великих значень під час пуску і реверсування. Під дією цих сил в ізоляції виникають тріщини, а також механічні пошкодження. Особливо небезпечною для ізоляції обмоток електричних машин є вібрація, яка виникає у зв'язку з незрівноваженістю обертових частин, згином вала, під час зношування підшипників, при обриві стрижнів короткозамкнених обмоток роторів і з інших причин. Вібрація може також передаватися на електричні машини з боку привідних механізмів. Вібрація може скоротити строк служби ізоляції в декілька разів. До зношування виткової ізоляції може призводити тертя між витками і витками з корпусною ізоляцією, яке виникає в електричних машинах внаслідок різних коефіцієнтів теплового розширення міді обмоток і активної сталі сердечників.

Важливим показником, який використовується під час експлуатації, діагностування і прогнозування працездатності ізоляції є строк її служби і залежність його від температури. В результаті було сформульоване „правило восьми градусів”, згідно з яким підвищення температури на кожні вісім градусів призводить до скорочення строку служби ізоляції вдвічі.

Електричному старінню під дією електричних полів піддається ізоляція високовольтних електричних апаратів, причому суттєвий вплив полів виявляється в ізоляції обмоток електричних машин напругою 6 кВ і вище. Особливу загрозу для ізоляції, з певним рівнем старіння і пониженою електричною міцністю становлять комутаційні перенапруги, які можуть перевищувати значення напруги живлення в 7 разів.

Значний вплив на прискорення процесу старіння ізоляції має волога. Зволоження є однією з основних причин пробою ізоляції обмоток електричних машин, особливо намотаних проводами з бавовняного обплетення, що має високу гігроскопічність. Волога, яка проникає в пори і тріщини, значно знижує електричну міцність ізоляції. Небезпечним є також зволоження забруднених обмоток. При зволоженні обмоток з дефектами в ізоляції опір ізоляції знижується в декілька десятків разів і при цьому різко збільшуються струми втрат через ізоляцію. В цих випадках через дефекти в ізоляції під дією напруги проходить струм, який руйнує ізоляцію, внаслідок чого виникає коротке замикання між витками обмоток або замикання обмоток на землю. В електричних машинах, які мають такі дефекти ізоляції, потрібно замінити обмотки, тобто здійснити капітальний ремонт.

Якщо ізоляція не має технологічних дефектів, то під дією температури, вібрації, зволоження, зовнішнього середовища та інших факторів протягом часу відбувається поступове старіння ізоляції, яке виражається в її всиханні, випаровуванні летучих компонентів, втраті еластичності, виникненні пор і тріщин. В „найслабших” місцях ізоляції виникають місцеві дефекти, які мають низьке значення напруги пробою. В моменти перенапруг (атмосферних або комутаційних) в місці дефекту виникають іскрові розряди, які повторюються при кожній наступній перенарузі, значення якої перевищує напругу пробивання місця дефекту. Внаслідок дії розрядів пробивна напруга поступово зменшується до тих пір, поки в місці дефекту не виникне дуговий розряд від робочої напруги між витками. В цьому випадку настає повне міжвиткове замикання і обмотка електродвигуна виходить з ладу.

Хімічні фактори старіння полягають у дії хімічних агентів на елементи електроустановок. Наприклад, гуми, використовувані для герметизації, набухають у багатьох розчинниках, у тому числі бензині, трансформаторній олії. При набряканні вони приводять до

розгерметизації. Найбільш значний вплив вологи на електричну ізоляцію, особливо на рідкі діелектрики і гідрофільні тверді діелектрики (картон, папір). Наприклад, досить приблизно 0,1% води у трансформаторній оліві, щоб її електрична міцність зменшилася приблизно у два рази. Відповідно, трансформатор, заповнений такою олією, може вийти з ладу при незначних перенапругах, або навіть при робочій напрузі. Волога зменшує не тільки електричну міцність, але і механічну міцність. Періодичне зволоження і висушування може привести до короблення виробів, розшарування, розтріскування і т.д., що характерно для паперової ізоляції і картону.

З техногенних факторів старіння, у першу чергу, виділимо вплив електричної напруги. Це вплив різноманітного ряду явищ, що відбуваються в матеріалі: часткові розряди, дендрити, дуга, вода, нагрів за рахунок діелектричних втрат.

Старіння неорганічних діелектриків притаманне роботі пристрою при постійній напрузі, при змінній напрузі старіння практично відсутнє. При цьому іони, що містяться в діелектрику, дрейфують до відповідного електрода і розряджаються на них.

Органічні діелектрики слабостійкі до атмосферних і експлуатаційних впливів. Старіння при постійній напрузі практично відсутнє, при змінній напрузі вони старіють за рахунок часткових розрядів, дендритів. Вплив високої температури, плазми розряду, випромінювання розряду веде до розкладання матеріалу і до появи дендриту.

## **Контрольні запитання**

1. Що таке діелектрики? В яких межах змінюється їх питомий опір?
  2. Опишіть механізм і типи провідності діелектриків.
  3. Чому у твердих діелектриках розрізняють об'ємний і поверхневий електричні опори?
  4. За якими схемами і в яких одиницях вимірюють питомий об'ємний  $\rho_V$  і питомий поверхневий  $\rho_S$  електричні опори? За якими формулами їх можна обчислити?
  5. Охарактеризуйте види поляризації.
  6. Що таке діелектрична проникність?
  7. Що таке діелектричні втрати на постійному і змінному струмі та які параметри для них характерні?
  8. Схеми заміщення діелектрика з втратами. Умова еквівалентності цих схем.
  9. Які причини втрат енергії в діелектриках?
  10. У чому різниця в термінах: пробивна напруга і електрична міцність діелектрика?
  11. Який механізм пробую рідких діелектриків?
  12. Який механізм пробую газоподібних діелектриків?
  13. Види пробую твердих діелектриків.
- Охарактеризуйте класи ізоляції електрорадіоматеріалів.
14. Назвіть фактори, що впливають на електричну міцність твердих діелектриків?
  15. Назвіть фактори, що впливають на якість електричної ізоляції.

## РОЗДІЛ 2. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

### 2.1. Рідкі діелектрики

З електрофізичної точки зору найбільш важливими характеристиками рідин є діелектрична проникність, електропровідність і електрична міцність.

*Електропровідність* рідких діелектриків зумовлена переміщенням іонів в результаті дисоціації молекул рідини і домішок, а також переміщенням заряджених частинок домішок – моліонів. Електропровідність рідких діелектриків у значній мірі залежить від стану їх чистоти. Як забруднення можна розглядати воду або інші посторонні рідини, а також різноманітні тверді частинки. Очистка рідких діелектриків від домішок суттєво підвищує їх питомий опір, однак повністю видалити домішки із рідкого діелектрика практично неможливо. Електропровідність будь-якої рідини суттєво залежить від температури. З підвищенням температури зростає рухливість іонів та степінь теплової дисоціації. Ці два фактори суттєво збільшують електропровідність.

Діелектричні втрати в рідких діелектриках залежать від того чи рідина полярна, чи неполярна. В неполярних рідинах, що не містять домішок, діелектричні втрати визначаються втратами на електропровідність. Підвищення температури викликає збільшення діелектричних втрат, а частота не впливає на них.

У *неполярних* рідин діелектрична проникність визначається тільки електронною поляризацією. Діелектрична проникність неполярної рідини зі збільшенням температури зменшується, наближаючись до одиниці. Це явище пояснюється зменшенням числа молекул в одиниці об'єму. Як показує досвід, діелектрична проникність неполярних рідин (конденсаторна, трансформаторна олива) не залежить від частоти. Наприклад для соволу, діелектрична проникність визначається одночасно електронною та дипольною поляризаціями.

Для *полярних* рідин, що використовуються в якості технічних діелектриків, діелектрична проникність становить від 3 до 40. В полярних рідинах поряд із втратами на електропровідність основне місце займають втрати, що зв'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією. Вони мають чітко виражений температурний і частотний максимум, залежать від в'язкості рідини, оскільки поворот диполів у в'язкій рідині викликає втрати енергії на тертя молекул.

Полярні рідини не рекомендується використовувати за високих частот, так як вони мають підвищені діелектричні втрати.

Електрична міцність рідких діелектриків в основному визначається наявністю сторонніх домішок (води, газів, твердих частинок), а також полярністю рідини, температурою та іншими факторами. Електрична міцність забруднених рідин набагато менша, ніж чистих.

Рідкі діелектрики за своїм призначенням поділяються наступним чином:

1) *за хімічною природою*: а) нафтові ізоляційні оливи; б) синтетичні рідини (хлоровані вуглеводні, кремній- і фторорганічні рідини, складні ефіри різних типів);

2) *за специфікою застосування*: а) для трансформаторів і вимикачів; б) конденсаторів; в) кабелів; г) систем циркуляції охолодження та ізоляції випрямлювальних установок.

3) *за верхньою межею допустимої робочої температури*: а) до  $95^{\circ}\text{C}$  (всі нафтові оливи); б) до  $135^{\circ}\text{C}$  (синтетичні вуглеводні, хлорпохідні вуглеводнів, деякі ефіри кремнієвої кислоти, фосфорної та органічних кислот); в) до  $200^{\circ}\text{C}$  (деякі типи фторвуглеводів); г) до  $250^{\circ}\text{C}$  (поліфенілефірні і спеціальні поліорганосилоксани).

4) *За ступенем горючості*: а) горючі; б) негорючі.

*Вимоги до рідких діелектриків:*

1. Висока електрична міцність.
2. Високий електричний опір.
3. Величина діелектричної проникності вибирається в залежності від особливості всієї системи ізоляції.
4. Діелектричні втрати – найменші.
5. Висока стабільність в умовах експлуатації і зберігання.
6. Мінімальна в'язкість в діапазоні робочих температур.
7. Сумісність з твердою ізоляцією і конструкцією матеріалів.
8. Економічність застосування.

*Діелектрична проникність* є якісною характеристикою рідин і характеризується дипольним моментом та поляризацією молекул. Як приклад – у неполярного діелектрика гексану дипольний момент відсутній, поляризація має чисто електронний характер і, внаслідок цього, діелектрична проникність низька  $\epsilon \leq 2$ . Трансформаторна олива, будучи сумішшю речовин, має у своєму складі невелику кількість полярних молекул, що володіють дипольним моментом. Тому діелектрична проникність зростає до  $\epsilon \approx 2,2 \div 2,4$ . Касторова

олива має більше полярних молекул, отже й більша діелектрична проникність ( $\epsilon \approx 4,5$ ). Етиловий спирт, гліцерин, вода є представниками полярних речовин, діелектрична проникність яких відповідно дорівнює 24; 40; 81.

Для неполярних рідин з  $\epsilon < 3$  діелектричну проникність можна розрахувати, знаючи концентрацію і поляризацію молекул. Для цього застосовується формула Клаузіуса-Моссотті, що пов'язує діелектричну проникність діелектрика з його поляризацією

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{M}{D} = \frac{4\pi}{3} N_A \alpha, \quad (2.1)$$

де  $M$  – молекулярна маса речовини, кг/моль;  $\alpha$  – коефіцієнт поляризації;  $N_A$  – стала Авогадро, моль<sup>-1</sup>;  $D$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Позначивши через  $c = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{N_A}{M} \alpha$ , отримаємо

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = c \cdot D. \quad (2.2)$$

Очищення діелектричних рідин може здійснюватися дистиляцією, в тому числі під вакуумом, частковою кристалізацією, абсорбцією, іонним обміном. При цьому, як правило, зменшується електропровідність та діелектричні втрати, зростає електрична міцність. Основною домішкою, що підвищує провідність рідких діелектриків, є вода, а основними домішками, що зменшують електричну міцність, є мікрочастинки, мікропухирці і вода. Тому на практиці для регенерації трансформаторної оливи її фільтрують, осушують за допомогою пропускання через ємність, заповнену адсорбентами (цеолітами або силікагелем). За рахунок різних способів очищення рідин у дослідженнях вдавалося одержати електропровідність, близьку до електропровідності деяких високоякісних твердих діелектриків, а саме до  $10^{-19}$  См/м.

*Електрична міцність* – також як і електропровідність у значній мірі є технологічною характеристикою рідкого діелектрика й електродів і експлуатації ізоляційного проміжку. На неї впливають не тільки ті домішки, що визначають електропровідність, але й форма та матеріал електродів, тривалість імпульсу, наявність пухирців.

До найважливіших рідких діелектриків відносять нафтові оливи та деякі синтетичні рідини. Крім загальних вимог, спільних для всіх діелектричних матеріалів, до рідких ставлять додаткові



вимоги: стабільність в умовах експлуатації та зберігання, сумісність з іншими матеріалами тощо.

**Трансформаторна олива** – найпоширеніший у електротехніці рідкий діелектрик. Це очищена фракція нафти, що одержується під час перегонки за температури кипіння від 300 °С до 400 °С. У залежності від походження нафти олива має різні властивості та складну вуглецеводну будову із середньою вагою молекул 220÷340 а.о., і містить такі основні компоненти: парафіну – 70÷80%, ароматичних вуглеводнів – 15÷20%, з'єднання сірки та азоту – <2%, антиокисної присадки – 0,5%. Кожний з компонентів оливи відіграє значну роль під час експлуатації. Парафіни і циклопарафіни забезпечують низьку електропровідність і високу електричну міцність. Ароматичні вуглеводні зменшують старіння оливи і збільшують стійкість до часткових розрядів. Сірчані, азотні з'єднання є домішками, що спричиняють процеси корозії металів у трансформаторній оливі.

Вуглеводні парафінового ряду, крім високої хімічної стійкості, мають високу температуру спалаху і багато інших позитивних якостей, але застигають уже за кімнатної температури і тому тут не допускається великого вмісту парафінів. Першою операцією готування трансформаторної оливи з нафти є фракційна перегонка під вакуумом. Під час перегонки нафта шляхом випару розділяється на ряд фракцій, кожна з яких містить близькі за температурою кипіння і подібні за властивостями вуглеводні. Спочатку від нафти відокремлюються найбільш легкі вуглеводні: бензин, гас. Потім переганяються більш важкі фракції, так званий соляровий дистилят, з якого і готується олива. Перегонка не забезпечує однорідного складу оливи, тому що в дистилят потрапляє цілий ряд суміжних фракцій. Крім того, у ньому присутні шкідливі домішки, що погіршують властивості оливи.

Для одержання повноцінного продукту нафта піддається очищенню від нафтових кислот, смол, сірки і ненасичених з'єднань. Ця операція називається рафінуванням. Для повного видалення вологи промита олива піддається сушінню продувкою повітря. Остаточне очищення оливи здійснюється її обробкою при температурі 70÷80 °С адсорбентом.

З основних характеристик трансформаторної оливи відзначимо, що вона горюча, практично не токсична і не порушує озонового шару. Густина оливи знаходиться в межах  $(0,84\div 0,89)\cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

В'язкість є однією з найважливіших властивостей оливи. З міркувань високої електричної міцності олива повинна мати високу в'язкість. З іншого боку, для того, щоб добре виконувати свої додаткові функції в трансформаторах (як охолоджуване середовище) і вимикачах (як середовище, де рухаються елементи привода), вона повинна мати невисоку в'язкість, інакше трансформатори не будуть належним чином охолоджуватись, а вимикачі – розривати електричну дугу у встановлений для них час. Тому вибирають компромісне значення в'язкості для різних олив. Кінематична в'язкість для більшості олив за температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  складає  $(28\div 30)\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ .

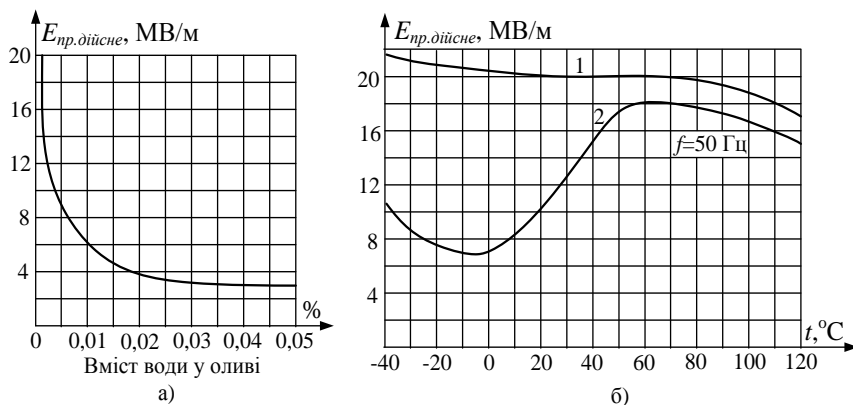


Рис.2.1. Залежність електричної міцності трансформаторної оливи від вмісту води в ній а) та залежність електричної міцності трансформаторної оливи від температури б): 1 – суха олива, 2 – олива, що містить сліди води

Температурою застигання називається температура, за якої олива застигає настільки, що при нахиленні пробірки з охолодженою оливою під кутом  $45^{\circ}$  її рівень залишиться незмінним протягом 1 хв. У масляних вимикачах температура застигання має вирішальне значення. Свіжа олива не повинна застигати при температурі „ $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ “; у південних районах країни дозволяється застосовувати оливу з температурою застигання „ $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ “. З інших теплофізичних характеристик відзначимо порівняно невелику теплопровідність  $\lambda = 0,09\div 0,14\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , що зменшується в залежності від температури. Теплоємність  $c$ , навпаки, збільшується з ростом температури від  $1,5\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  до  $2,5\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Коефіцієнт теплового розширення оливи визначає вимоги до розмірів розширювального бака трансформатора і складає приблизно

но  $6,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Питомий опір оливи нормується за температури  $90^\circ\text{C}$  і напруженості поля  $0,5 \text{ МВ/м}$ , і він не повинен перевищувати  $5 \cdot 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  для будь-яких сортів олив. Відзначимо, що питомий опір, як і в'язкість, різко зменшується з ростом температури (більш ніж на порядок від зменшення температури на  $50^\circ\text{C}$ ). Діелектрична проникність оливи невелика і коливається в межах  $2,1 \div 2,4$ . Тангенс кута діелектричних втрат визначається наявністю домішок в оливі. У чистій оливі він не перевищує  $2 \cdot 10^{-2}$  за температури  $90^\circ\text{C}$  і робочої частоти  $50 \text{ Гц}$ . В окисленій, забрудненій і зволоженій оливі  $\text{tg}\delta$  зростає і може досягати значень  $\text{tg}\delta > 0,2$ . Електрична міцність оливи визначається в стандартному розряднику з напівсферичними електродами діаметром  $25,4 \text{ мм}$  і міжелектродною відстанню  $2,5 \text{ мм}$ . Пробивна напруга повинна складати не менше  $70 \text{ кВ}$ , при цьому в розряднику електрична міцність оливи буде не меншою, ніж  $280 \text{ кВ/см}$ .

Якісна трансформаторна олива має світло-жовтий колір. Сильне потемніння у процесі експлуатації показує на псування оливи внаслідок забруднення або окислення. Вона повинна зберігати прозорість при охолодженні до  $+5^\circ\text{C}$ . Прозорість перевіряють у скляній прямокутній посудині, на одну із стінок якої наклеюють смужку паперу з нанесеними на неї чорною тушшю трьома лініями товщиною  $0,1$ ;  $0,5$  і  $1,0 \text{ мм}$ . Якщо через шар масла в  $100 \text{ мм}$  чітко видно всі лінії, то масло якісне; якщо лінію товщиною  $0,5 \text{ мм}$  видно не чітко, а лінію товщиною  $1 \text{ мм}$  – чітко, то бажана очистка; при меншій прозорості масла необхідна термінова очистка.

В оливі не повинно бути води. Якщо під час опускання в пробірку з оливою розпеченого дроту роздається тріск, то це означає, що в оливі є волога і її необхідно очищати і сушити.

Для визначення розчинених у воді кислот і лугів використовують реакцію водяної витяжки, яка проводиться за допомогою індикаторів, здатних різко змінити свій колір за наявності незначної кількості кислоти або лугу.

Пробивна напруга експлуатаційної оливи, яка характеризує її електричну міцність і визначається за допомогою стандартних апаратів (наприклад, АИИ-70, АКИ-50, АИИМ-72 та ін.), повинна бути не меншою  $25 \text{ кВ}$  для апаратів з напругою до  $15 \text{ кВ}$  і не нижче  $30 \text{ кВ}$  для апаратів з напругою до  $35 \text{ кВ}$  включно.

Для видалення води оливу нагрівають різними методами: струмом короткого замикання, втратами у власному баку, струма-

ми нульової послідовності. В деяких випадках для очищення оливи досить того, щоб вона відстоялася у відповідній ємності у приміщенні з відносно сухим і чистим повітрям. Але найбільш поширеним є сушіння оливи за допомогою центрифугування при температурі  $40\div 50$  °С. При цьому олива очищується не тільки від води, а й від важких механічних домішок.

Від легких механічних домішок, а також від води масло очищають за допомогою фільтрпресів. У фільтрпресі масло за температури  $40\div 50$  °С під тиском  $3\div 5$  атм. проганяється через фільтрувальний папір, який втягує вологу і затримує механічні домішки – волокна, шлаки, сажу тощо. Під час очищення фільтрувальний папір замінюють через  $1\div 4$  години. Його можна промивати, сушити і знову використовувати.

Фільтрпрес зазвичай використовують після центрифуги, добиваючись майже граничної очистки оливи від домішок. Центрифугуванням і фільтруванням очищують оливу, але не відновлюють її втрачені властивості. Для видалення з оливи продуктів окислення і для відновлення її попередньої якості проводять регенерацію.

Регенерацію оливок проводять за допомогою адсорбентів – речовин, здатних поверхнею своїх частинок поглинати продукти старіння масла і вологу (явище адсорбції). В ролі адсорбентів використовуються природні відбілювальні глини, амфорне або активоване вугілля, окиси алюмінію, селикагелі (роздрібнена кремнекислота) і цеоліт.

Регенерацію проводять контактним або перколяційним способом. В першому випадку адсорбент в розмеленому і прожареному вигляді додають у підігріту до  $80\div 90$  °С оливу, перемішують, відстоюють, після чого оливу відправляють на фільтрування. В другому випадку оливу пропускають через адсорбент, а потім фільтрують.

Останнім часом регенерацію оливи проводять безпосередньо в трансформаторі під час його експлуатації. Для цього трансформатори обладнують спеціальними термосифонними фільтрами, поглинаючими патронами і повітросушниками, заповненими селикагелем. Під час експлуатації олива, проходячи через селикагель, відновлює свої властивості.

Існує велика різниця між терміном служби трансформатора і терміном служби оливи. Трансформатор може працювати без ремонту  $10\div 15$  років, олива ж вже через рік вимагає очищення, а че-

рез 4÷5 років – регенерації. Мірами, що дають змогу продовжити термін експлуатації оливи, є: 1) захист оливи від контактування з повітрям шляхом установки розширників з фільтрами, що поглинають кисень і воду; 2) зниження перегріву в умовах експлуатації; 3) регулярні очищення від води і шлаків; 4) підвищення стабільності оливи шляхом введення антиокислювачів.

Антиокисна присадка спеціально вводиться в оливу для запобігання її окислюванню під дією локальних високих температур і реакцій із провідниковими і діелектричними матеріалами.

**Конденсаторні оливи** – об'єднана група різних діелектриків, що застосовується для просочення паперово-масляної і паперово-плівкової ізоляції конденсаторів. Найбільш поширену конденсаторну оливу отримують із трансформаторної оливи шляхом більш глибокого очищення. Відрізняється вона від звичайних олив більшою прозорістю, меншим значенням  $tg\delta$ .

**Касторова олива** – олива рослинного походження, що використовується для просочення паперових конденсаторів при роботі в імпульсних умовах. Густина касторової оливи  $D = 950\div 970$  кг/м<sup>3</sup>, температура застигання від  $-10$  °С до  $-18$  °С. Її діелектрична проникність при  $20$  °С становить  $4,0\div 4,5$ ;  $tg\delta = 0,01\div 0,03$  при  $20$  °С, а при  $100$  °С  $tg\delta = 0,2\div 0,8$ ;  $E_{np} = 15\div 20$  МВ/м при  $20$  °С. Касторова олива не розчиняється в бензині, але розчиняється в етиловому спирті. Цей діелектрик належить до слабополярних рідких діелектриків, його питомий опір за нормальних умов сягає  $10^8\div 10^{10}$  Ом·м. Кабельні оливи призначені для просочення паперової ізоляції силових кабелів. Основою їх також є нафтові оливи. Від трансформаторної оливи відрізняються підвищеною в'язкістю, підвищеною температурою спаху і зменшеними діелектричними втратами.

**Синтетичні рідкі діелектрики** в багатьох випадках мають кращі характеристики від нафтових електроізоляційних олив. Розглянемо найважливіші з них.

**Хлоровані вуглеводні** отримують з різних вуглеводнів (дифенілу, бензолу) шляхом заміни в їх молекулах частини атомів водню атомами хлору. З числа найбільш вживаних хлорованих вуглеводнів є **совол**. Совол – прозора безбарвна рідина. Він стабільніший при роботі в електричному полі, ніж трансформаторна олива. Діелектрична проникність соволу при нормальній температурі і низькій частоті струму  $\epsilon \approx 5$ , тобто більш ніж у два рази перевищує проникність нафтової оливи. Заміна соволом нафтової оливи у вироб-

ництві силових паперових конденсаторів дає змогу зменшити габарити конденсатора при однаковій реактивній потужності приблизно в два рази. Це дає великий економічний вигравш, хоча совол і дорожчий за оливу. Недоліком конденсаторів, просочених соволом, є сильне зменшення ємності при падінні температури нижче 0 °С. Хлоровані дифеніли негорючі. Проте їх недоліком є висока токсичність як самих рідин, так і їх парів.

**Кремнійорганічні рідини** володіють досить малим кутом діелектричних втрат, низькою гігроскопічністю і підвищеною нагрівостійкістю, низькою температурою застигання (до -140 °С). Для них характерна слабо виражена залежність в'язкості від температури. Як і інші кремнійорганічні з'єднання, кремнійорганічні рідини досить дорогі, що обмежує їх застосування. Залежно від характеру радикалів, приєднаних до атомів кремнію  $Si$ , розрізняють поліметилсилоксанові (ПМС), поліетилсилоксанові (ПЕС) і поліметилфеніл-силоксанові (ПМФС) рідини.

Ці рідини при частоті 1 кГц і температурі 20 °С мають такі електрофізичні параметри:  $\varepsilon = 2,5 \div 3,3$ ,  $tg\delta = 0,0001 \div 0,0003$ ,  $E_{np} = 14 \div 18$  МВ/м, тривала допустима робоча температура  $t_{дон} = 250$  °С. Їх діелектричні характеристики майже не залежать від частоти і температури, тому застосовують для просочування ізоляції конденсаторів, що призначені для роботи в області високих частот, при підвищених температурах.

**Фторорганічні рідини** є похідними вуглеводнів, у молекулах яких атоми водню частково або повністю заміщені атомами фтору. Характеризуються досить низьким  $tg\delta$ , низькою гігроскопічністю і високою нагрівостійкістю. Окремі фторорганічні рідини можуть тривало працювати при температурі 200 °С і вище. Пари деяких фторорганічних рідин мають високу для газоподібних діелектриків електричну міцність. Характерними властивостями фторорганічних рідин є мала в'язкість, низький поверхневий натяг, що сприяє просоченню пористої ізоляції, високий температурний коефіцієнт об'ємного розширення. Фторорганічні рідини здатні забезпечувати значно інтенсивніше відведення тепла від охолоджуваних ними обмоток і магнітопроводів, ніж нафтові масла або кремнійорганічні рідини. Існують спеціальні конструкції малогабаритних електротехнічних пристроїв із заливкою фторорганічними рідинами, в яких для покращення відведення тепла використовується випаровування рідини з подальшою конденсацією її в охолоджувачі і повер-

ненням в пристрій. При цьому теплота випаровування відводиться від охолоджуваних обмоток, а наявність в просторі над рідиною фторорганічної пари, особливо під підвищеним тиском, значно збільшує електричну міцність газового середовища в апараті.

Важливою перевагою фторорганічних рідин в порівнянні з кремнійорганічними є повна негорючість і висока дугостійкість. Як і кремнійорганічні з'єднання, фторорганічні рідини дороговартісні.

Найважливіші характеристики основних електроізоляційних рідин відображено у таблиці 2.1.

Табл.2.1.

<b>Рідина</b> <b>Параметр</b>	<b>Совол</b>	<b>Трансформа-</b> <b>торна олива</b>	<b>Конденса-</b> <b>торна олива</b>
Густина $D$ , кг/м <sup>3</sup>	1500÷1560	840÷890	850÷920
Питомий електричний опір $\rho$ , Ом·м	$10^{14} \div 10^{15}$	$10^{14} \div 10^{15}$	$10^{14} \div 10^{16}$
Діелектрична проникність $\epsilon$	5,0÷5,2	2,1÷2,4	2,1÷2,3
$tg\delta$ , $\cdot 10^{-3}$ при $t = 20$ °C і частоті $f = 50$ Гц	2÷ 4	0,6÷1	0,3÷0,6
Електрична міцність, $E_{пр}$ при $t = 20$ °C	14÷18	15÷20	20÷25

## 2.2. Газоподібні діелектрики

Із множини газів, що існують в природі, або можуть бути отримані штучно, лише невелика кількість застосовується в електро-радіотехніці. Це викликано вимогами до них, що обмежують їх вибір, а саме: хімічна інертність, нетоксичність газу та продуктів його розкладу при електричному розряді, невисока вартість, негорючість тощо.

Важливою властивістю газів є їхня здатність відновлювати електричну міцність після розрядів, що дає змогу їх застосовувати у вимикачах, розрядниках та інших апаратах.

Гази характеризуються низькою густиною, низькими діелектричною проникністю та втратами, високим питомим опором. Недоліком є їх невисока електрична міцність у порівнянні з рідкими та твердими діелектриками.

**Повітря** майже завжди входить до складу електротехнічних пристроїв і відіграє в них роль електричної ізоляції. В окремих частинах електричних установок, наприклад на ділянках повітряних

ліній електропередач між опорами, повітря утворює єдину ізоляцію між голими проводами лінії. При недостатньо ретельно проведеному просоченню ізоляції електричних машин, кабелів, конденсаторів в ній можуть залишатися повітряні включення, часто небажані, оскільки вони при високій робочій напрузі ізоляції можуть пришвидшити процеси утворення іонізації.

Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика. При відстані між електродами 1 см вона становить  $E_{np} = 3$  кВ/мм. Проте у разі потреби її можна збільшити шляхом застосування стисненого повітря з тиском  $P = 2 \div 3$  МПа. Сухе повітря містить 78,23% азоту, 20,81% кисню, все інше – аргон, гелій, неон, кріптон та ін. В реальних умовах повітря завжди містить вологу, що погіршує його ізоляційну здатність.

**Азот** має практично однакову з повітрям електричну міцність, однак не проявляє окислювальної дії на матеріали, що контактують з ним. Застосовується в конденсаторах, високовольтних кабелях, трансформаторах і т.п.

Деякі гази, що мають високу молекулярну масу і з'єднання, які містять галогени (*фтор*, *хлор*), для іонізації яких потрібна велика енергія, мають помітно підвищену в порівнянні з повітрям електричну міцність. Так, гексафторид сірки  $SF_6$  (шестифториста сірка) має електричну міцність приблизно в 2,5 раза вищу, ніж у повітря. Гексафторид сірки називають *елегазом* (скорочення від слів „електрика” і „газ”). Елегаз не токсичний, хімічно стійкий, не розкладається при нагріві до 800 °С, його з успіхом можна використовувати в конденсаторах, кабелях. Особливо великі переваги елегазу при підвищеному тиску.

**Дихлордифторметан  $CCl_2F_2$  – фреон** має електричну міцність, що близька до електричної міцності елегазу, але його температура кипіння сягає всього 242,7 К (-30,5 °С), і він при нормальній температурі може бути стиснений без зріджування лише до 0,6 МПа. Фреон викликає корозію деяких твердих органічних електроізоляційних матеріалів, що треба мати на увазі при конструюванні охолоджувальних пристроїв.

**Водень** також представляє значний інтерес. Це дуже легкий газ, що володіє досить хорошими властивостями для використання як середовище, що охолоджує, замість повітря. Водень характеризується високими значеннями питомої теплопровідності і теплоємності. При використанні водню охолодження електричних машин, що обертаються, істотно поліпшується. Крім того, при заміні



повітря воднем помітно знижуються втрати потужності на тертя ротора машини і на вентиляцію, оскільки ці втрати приблизно пропорційні густині газу. Унаслідок відсутності окислюваної дії кисню повітря сповільнюється старіння органічної ізоляції обмоток машини і усувається небезпека пожежі у разі короткого замикання усередині машини. В атмосфері водню поліпшуються умови роботи щіток. Тому водневе охолодження дає змогу підвищити потужність електричних машин та їх ККД. Потужні турбогенератори, синхронні компенсатори виконуються з водневим охолодженням. За інших однакових умов електрична міцність водню приблизно на 40% нижча, ніж електрична міцність повітря.

**Гелій** має особливо велике значення в якості низькотемпературного холодагента, зокрема для пристроїв, що використовують явище надпровідності. У нього найнижча в порівнянні з іншими газами температура зріджування (4,216 К при атмосферному тиску). Рідкий гелій має дуже малу густину. Квантовомеханічні явища в рідкому гелії роблять його поведінку багато в чому схожою з поведінкою газів, а не рідин. Діелектрична проникність рідкого гелію досить мала. Теплопровідності рідкого і газоподібного гелію майже однакові.

У таблиці 2.2 приведені властивості повітря і ряду широко вживаних в техніці газів, а також властивості тих же газів в зрідженому стані, які мають велике значення для електротехнічних пристроїв, що працюють при низькому тиску (так звані пристрої кріоелектротехніки).

Табл.2.2.

Параметр	Повітря	Азот	Кисень	Водень	Метан	Елегаз	Інертні гази				
		$N_2$	$O_2$	$H_2$	$CH_4$	$SF_6$	$He$	$Ne$	$Ar$	$Kr$	$Xe$
Молекулярна маса, $M$	29	28	32	2	16	146	4	20,2	40	83,8	131
Температура кипіння, $t_k$ (К)	79	77,4	90,2	20,4	11,7	318,7	4,2	27,2	87	120	166
Температура плавлення, $t_{пл}$ (К)	60	63,2	54,4	14	89,2	209,3	-	24,5	84	115	161
Густина, $D$ (кг/м <sup>3</sup> )	1,29	1,25	1,43	0,09	0717	6,39	0,2	0,9	1,8	3,47	5,6
Теплопровідність, $\gamma$ (Вт/м·К)	24	24	24	166	26	-	142	45,5	16	8,73	5
Теплоємність, $c$ (Дж/кг·К)	1,05	1,06	0,915	14,2	20,18	0,62	5,2	1,03	0,5	0,25	0,16
Динамічна в'язкість, $\eta$ (Па·с)	19	18	21	9,5	12	15	19	30	21	25	22

Іноді як криогенний хладагент, застосовується рідкий **неон**, температура кипіння якого дещо перевищує температуру кипіння водню. Для неону, як і для інших інертних газів, характерна досить мала різниця між температурою кипіння і температурою плавлення. Неон хімічно інертний і дуже дорогий.

## 2.3. Тверді діелектрики

### 2.3.1. Електроізоляційні полімери

Серед діелектриків особливе значення займають високомолекулярні органічні матеріали. Для того, щоб ознайомитись з властивостями і можливостями цих матеріалів, необхідно попередньо ознайомитись із загальними закономірностями, що стосуються їх будови і властивостей, а також звернути увагу на деякі терміни і поняття, що неодноразово будуть використовуватись у подальшому викладі.

**Органічними речовинами** називають з'єднання вуглецю з іншими елементами. Найбільше число органічних електроізоляційних матеріалів належить до високомолекулярних з'єднань, тобто до речовин з великими молекулами, що іноді містять тисячі атомів. До високомолекулярних речовин належать деякі, що зустрічаються в природі речовини: целюлоза, шовк, білки, каучук.

Отримані штучним шляхом високомолекулярні матеріали можуть бути розділені на два класи. До *першого* відносяться штучні матеріали, що виготовляються шляхом хімічної обробки природних високомолекулярних речовин. Так, під час переробки целюлози отримуються ефіри целюлози. Але найбільше значення як для електроізоляційної техніки, так і для інших галузей техніки має *другий* клас – синтетичні високомолекулярні матеріали, що виготовляються із низькомолекулярних речовин. Багато з цих матеріалів характеризуються цінними технічними властивостями, до того ж, деякі з них можуть бути отримані із легкодоступної сировини (природний газ, нафта, корисні копалини). Тому вивченню розробки і застосування таких матеріалів для різних цілей приділяється велика увага.

Практично всі важливі високомолекулярні з'єднання за своєю хімічною природою є полімерами, тобто речовинами, молекули яких представляють собою сукупність великої їх кількості, що мають однакові будови груп атомів і отримуються в результаті об'єднання один з одним молекул порівняно простих за своїм складом речовин, так званих мономерів.

Реакція утворення полімеру із мономеру називається *полімеризацією*. При полімеризації зростають молекулярна маса, температура плавлення, підвищується в'язкість, зменшується розчинність. У процесі полімеризації речовина може переходити із газоподібного і рідкого стану в стан досить густої рідини і далі – в стан твердого тіла. Розглянемо це на простому прикладі.

**Стирол** – рідкий ненасичений вуглеводень, що має елементарний склад  $C_8H_8$ . Завдяки наявності подвійного зв'язку між двома сусідніми атомами вуглеводню він має властивість легко полімеризуватись. Утворений в результаті полімеризації із стиrolу полімер полістирол – є вже твердою речовиною. Тут важливим показником полімеризації є степiнь полімеризації –  $n$ , тобто число молекул мономеру, що об'єднались в одну молекулу полімеру. Для полістиролу степiнь  $n$  може досягати 6000. Температура плавлення стиrolу рiвна  $-33\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура пом'якшення полістиролу  $70\div 80\text{ }^\circ\text{C}$ .

Процес полімеризації протікає за різних умов з різною швидкістю. Наприклад: стиrol не втрачає своїх властивостей на холодi довгий час, однак підвищення температури, додавання каталізаторів дають змогу різко прискорити перехід рідкого стиrolу в твердий полістирол. Таким чином швидкість полімеризації можна регулювати, змінюючи умови, в яких протікає процес полімеризації.

**Полістирол** – прозора, гнучка, негігроскопічна речовина. З полістиролу одержують пластичні маси, які широко застосовують в електрорадіотехніці. Оскільки структура молекул лінійна, дещо несиметрична, то його відносять до неполярних діелектриків. Звідси діелектрична проникність  $\epsilon$  і втрати ( $tg\delta$ ) невеликі і не залежать від частоти напруги. Тому область його застосування – високочастотні діелектрики в радіoeлектроніці.

Залежно від умов полімеризації та обробки полістирол поділяють на блоковий, суспензійний та ударостійкий.

З блочного полістиролу виготовляють ізоляційні плати, діелектричні антени та інші радіодеталі. Суспензійний полістирол є порошкоподібною речовиною, з якого радіодеталі отримують гарячим пресуванням або литтям під тиском. Ударостійкий полістирол застосовують у вузлах радіоапаратури з підвищеною механічною міцністю до ударних навантажень, вібрацій тощо.

Ізоляційні плівки з полістиролу товщиною  $10\div 20\text{ мкм}$  і шириною  $20\div 100\text{ мм}$  успішно застосовують для гнучкої ізоляції високочастотних кабелів ( $f > 500\text{ кГц}$ ) і плівкових конденсаторів.

Недоліками полістиролу є його крихкість при знижених температурах, схильність до поступового утворення поверхневих тріщин, мала стійкість до дії розчинників (зокрема, рідких вуглеводнів) і невисока нагрівостійкість ( $\approx 75^\circ\text{C}$ ).

Основні електрофізичні параметри полістиролу подано в таблиці 2.3.

Табл.2.3.

Тип полістиролу Параметр	Блоковий	Суспензійний	Ударостійкий
$\rho_v$ , Ом·м	$10^{15}$	$10^{14}$	$10^{13}$
$\epsilon$	2,4	2,7	2,7
$tg\delta \cdot 10^{-4}$	3	6	6
$E_{np}$ , МВ/м	30÷35	20÷25	25
Холодостійкість, $^\circ\text{C}$	-45	-40	-60

Полімери діляться на дві групи: *лінійні* і *поверхневі*. Молекули перших мають вигляд ланцюжків або ниток. Молекули поверхневих полімерів розміщені в просторі в різних напрямках більш рівномірно. Легко зрозуміти закономірність утворення лінійних або поверхневих полімерів. Якщо молекули мономеру мають тільки по дві реактивні точки, тобто по дві валентності, здатні розчеплюватись і з'єднуватись з іншими молекулами, то при полімеризації отримується лінійний полімер – ланка, що не має ніяких розгалужень.

Між властивостями лінійних і поверхневих полімерів є суттєві відмінності. Як правило, лінійні полімери відносно гнучкі та еластичні і багато з них за повільного підвищення температури пом'якшуються, а потім розплавлюються. Поверхневі полімери володіють більшою жорсткістю; їх розм'якшування проходить лише за досить високих температур, а багато з них ще до досягнення температури пом'якшення хімічно руйнуються. Лінійні полімери здатні розчинятись в розчинниках, поверхневі – важкорозчинні або практично нерозчинні.

На практиці за тепловими властивостями полімери ділять на *термопластичні* та *терморективні*. Термопластичні матеріали при низьких температурах тверді, але при нагріванні пом'якшуються і легко деформуються. Характерною особливістю термопластичних матеріалів є те, що нагрівання до температури, що відповідає їх пластичному стану, не викликає необоротних змін їх властивостей. Після охолодження ці матеріали зберігають здатність розчинятись і при повторному підвищенні температури пом'якшуватись.

У противагу матеріалам цієї групи термореактивні матеріали (реактопласти) при нагріванні зазнають необоротну зміну властивостей, тобто вони запікаються, набуваючи при цьому значну механічну міцність і твердість. Термореактивні матеріали – нерозчинні.

Отже, термопластичні матеріали – це лінійні полімери, що зберігають лінійну будову молекул і під час нагрівання (полістирол). Термореактивними є матеріали, які при нагріванні набувають будову, властиву поверхневим полімерам.

Якщо електрична ізоляція в процесі експлуатації повинна витримувати дію підвищених температур, не пом'якшуючись, не деформуючись, і зберігати високу механічну міцність, або вона повинна бути стійкою до розчинників, що контактують з нею, то для такої ізоляції більш придатні термореактивні матеріали.

### 2.3.2. Експлуатаційні властивості основних полімерів

В електроізоляційній техніці застосовують як синтетичні полімери, так і природні полімери. Етилен  $C_2H_4$  в широких масштабах виробляється з продуктів крекінгу нафти. Тривалий час єдиним способом отримання *поліетилену* була полімеризація етилену при досить високому (до 300 МПа) тиску і температурі більше 200 °С. При цьому ініціатором реакції є кисень, що вводиться у реактор в невеликих кількостях. Отриманий таким шляхом поліетилен називають поліетиленом високого тиску (ПЕВТ). Поліетилен – неполярний, термопластичний діелектрик.

Поліетилен низького тиску (ПЕНТ) отримується при тиску 0,3÷0,6 Мпа і температурі 80 °С. Тут каталізатором є хлорид титану  $TiCl_4$ . Можливе також виготовлення поліетилену середнього тиску (ПЕСТ):  $P = (3÷7)$  МПа, температура  $t = 160÷275$  °С, каталізатор – оксид хрому  $CrO_3$ .

За електроізоляційними властивостями ПЕНТ і ПЕСТ, якщо вони добре очищені від слідів каталізатора і інших домішок, не поступаються ПЕВТ. Особливою перевагою ПЕСТ є його менша в порівнянні з іншими типами поліетилену газопроникність. Поліетилен різних типів з врахуванням приведених вище особливостей кожного типу широко використовуються в ізоляції кабелів (силових, телефонних і т.д.). Випускається у виді плівок, стрічок та інших виробів. До інших переваг всіх видів поліетилену відносять їх хімічну інертність, вологостійкість, високі електричні характеристики, стабільні в широкому частотному діапазоні.

В таблиці 2.4 наведені основні властивості поліетилену.

Табл.2.4

Тип поліетилену Параметр	ПЕВТ	ПЕСТ	ПЕНТ
$\rho_v$ , Ом·м	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$
$\epsilon$	2,3	2,3	2,3
$tg\delta, \cdot 10^{-4}$	2÷5	4	4
$E_{pp}$ , МВ/м	40÷50	40÷45	40÷45
Холодостійкість, °С	-70	-60	-40
Температура плавлення, °С	110	130	125
Міцність на розтяг, МПа	7÷14	27÷33	20÷23

До недоліків слід віднести невисоку робочу температуру ( $\approx 70$  °С), старіння під дією світла, горючість.

Нагрівостійкість поліетилену під час короточасного нагрівання обмежується швидким пониженням механічної міцності, а при довготривалій дії підвищеної температури – окисленням в умовах доступу повітря. Процес теплового старіння поліетилену може бути сповільнений введенням до складу матеріалу антиокислювачів. Старіння під дією світла послаблюється введенням до складу поліетилену сажі (до 2%). Для підвищення нагрівостійкості поліетилену його можна піддавати дії іонізуючих випромінювань. Опромінений в деформованому стані поліетилен має цікаву властивість: під час повільного нагрівання повертає свою попередню форму і розміри, які були до опромінення. Це явище називається термоусадкою. Поліетилен успішно застосовується в електроізоляційних муфтах і трубах та ізоляції телевізійних і радіочастотних кабелів.

**Поліпропілен** – лінійний неполярний полімер мономеру пропілену  $H_2C = CH - CH_3$ . Електроізоляційні властивості поліпропілену подібні до властивостей поліетилену. Однак поліпропілен більш холодостійкий і гнучкий. З поліпропілену виготовляються плівки і фасонні вироби методом лиття під тиском. Його можна застосовувати як комбінований паперово-плівковий діелектрик в силових конденсаторах, як плівковий діелектрик в обмоткових проводах і т.д.

**Поліметилметакрилат** (органічне скло, плексиглас) – твердий безбарвний неполярний діелектрик, якого отримують в результаті полімеризації метилметакрилату  $C_5H_8O_2$ . Характеризується низькою гігроскопічністю, високою хімічною стійкістю до дії води, спиртів, жирів, масел, легко піддається механічній обробці,

легко зварюється при температурах 140÷150 °С і тиску 1 МПа. Virізняється невисокими електроізоляційними характеристиками ( $\rho$ ,  $\epsilon = \varphi(f)$ ,  $tg\delta$ ), тому застосовується як конструкційний та декоративний матеріал для виготовлення корпусів приладів, а також аналогічно до полівінілхлориду в дугогасних пристроях. Також знайшов застосування у виробництві оптичних волокон для виготовлення надгнучких оптичних кабелів.

Одним з суттєвих недоліків органічних синтетичних полімерів є низька температурна стійкість. Допустимі робочі температури більшості з них лежать в діапазоні від -60 °С до + 120 °С. Для підвищення теплостійкості як основу для органічних полімерів використовують мономери, атоми водню яких замінені атомами фтору. Найважливішими в електрорадіотехніці є фторорганічні (фторопласти) та кремнійорганічні полімери (полісилоксани).

**Полівінілхлорид** – лінійний термопластичний полімер газоподібного мономеру – вінілхлориду  $H_2C = CH - Cl$ , що є етиленом, в молекулі якого є один атом водню, заміщений атомом хлору.

Полівінілхлорид є полярним діелектриком і має гірші в порівнянні з неполярними полімерами властивості. Вологість слабо впливає на питомий опір полівінілхлориду. Він є стійким до дії води, кислот, лугів, спирту і використовується в електротехніці для виготовлення пластмас та гумоподібних продуктів, у деякій мірі для ізоляції проводів. Для покращення еластичності і холодостійкості до нього часто додають пластифікатори, що представляють собою важковипаровуючі органічні рідини. Так, для непластифікованого полівінілхлориду за нормальних температур і промислової частоти значення діелектричної проникності лежить в межах  $\epsilon = 3,2\div 3,6$ , а для пластифікованого  $\epsilon = 5\div 6$ .

Полівінілхлоридний пластифікат застосовують для виготовлення плівок, ізоляційних стрічок, трубок, монтажних і телефонних кабелів. При дії електричної дуги полівінілхлорид виділяє велику кількість газоподібних продуктів, що сприяють гасінню дуги. Ця властивість використовується в деяких типах розрядників.

**Поліетрафторетилен (фторопласт-4)**  $F_2C = C_2F$  – білий чи сіруватий напівпрозорий матеріал. Належить до полярних діелектриків і володіє надзвичайно високою для органічної речовини нагрівостійкістю (клас ізоляції С), що пояснюється високою енергією зв'язку атомів фтору і водню. Фтор входить до складу газів і рідких діелектриків, що мають дуже високу електричну міц-

ність. Він є абсолютно хімічно стійким і негорючим, не змочується водою та іншими рідинами. Матеріал порівняно м'який і схильний до холодотекучості. У певних умовах може перероблюватись як пластмаса, з нього отримують різноманітні фасонні вироби, листи, гнучкі плівки в якості ізоляції кабельних виробів. Але широкому впровадженню фторопласту-4 перешкоджає його висока ціна і складність технології виготовлення.

**Політрифторхлоретилен (фторопласт-3)**  $F_2C = CFCl$  через несиметричну будову молекул, викликану наявністю в них атомів хлору, є полярним діелектриком і за електричними властивостями дещо поступається фторопласту-4, зате технологія отримання простіша.

### 2.3.3. Поліконденсаційні синтетичні полімери (смоли)

**Смоли** – це складні суміші органічних високомолекулярних речовин. За низьких температур смоли є аморфними, склоподібними масами. При нагріванні смоли пом'якшуються, стаючи при цьому пластичними, а потім рідкими. В більшості випадків смоли нерозчинні у воді, малогігроскопічні, розчинні у відповідних розчинниках. Зазвичай вони характеризуються клейкістю і під час переходу з рідкого стану в твердий міцно прилипають до твердих речовин.

**Фенольно-формальдегідні смоли** належать до найбільш ранніх синтетичних смол. Це продукти поліконденсації фенолу  $H_5C_6 - OH$  з формальдегідом  $H_2CO$ . Поділяються на резольні (терморективні) та новолачні (термопластичні). Виготовляються нагрівом водного розчину фенолу і формальдегіду в присутності каталізатора.

**Бакеліт** є терморективною смолою з високою електричною міцністю і застосовується для просочування дерева при виготовленні гетинаксів, текстолітів. Бакеліт є твердим, крихким, малогігроскопічним полярним діелектриком, тому його діелектрична проникність висока.

**Новолак** є термопластичною смолою і після нагрівання зберігає плавкість та розчинність, використовується для виготовлення пластмасових виробів. Широкому застосуванню цих смол перешкоджають їх понижені електроізоляційні властивості, особливо у вологому середовищі, і низька стійкість до іскрових розрядів.

**Епоксидні смоли** характеризуються наявністю в їх молекулі епоксидних груп. В чистому вигляді вони є термопластичними



матеріалами, легко розчиняються в ацетоні, можуть довго зберігатись, не змінюючи своїх властивостей. Однак після добавлення до них затверджувача смоли швидко затвердівають, набуваючи поверхневу будову. Цей процес являє собою чисту полімеризацію без виділення води та інших низькомолекулярних речовин.

Великою перевагою епоксидних смол є їх відносно мала усадка під час затвердіння (0,5÷2)%, що здатна для отримання монолітної ізоляції. Іншою перевагою є їх висока адгезія по відношенню до пластмас, кераміки, металів. Завдяки високій нагрівостійкості вони можуть замінити більш дорогі кремній-органічні смоли. Для виготовлення лаків, клеїв, заливочних компаундів, наприклад, для заливки малопотужних трансформаторів або вузлів апаратури, застосовуються епоксидні смоли або їх композиції з іншими матеріалами.

До складу **кремній-органічних смол (силіконів)** поряд з вуглецем входить кремній, як складова частина неорганічних діелектриків: слюди, азбесту, кераміки. Основу їх молекул створює силосанова група атомів кремнію і кисню. Вони широко застосовуються в лаках, пластмасах, деякі з них еластичні. Електроізоляційні властивості кремній-органічних з'єднань високі навіть за підвищених температур. Нагрівостійкість їх вказує на цілеспрямованість її використання в композиції з нагрівостійкими неорганічними матеріалами (слюда, скло) у вигляді міканітів, склотканин. Крім цього, ці смоли володіють малою гігроскопічністю. Покриття цими з'єднаннями целюлозних матеріалів, пластмас, кераміки створює гідрофобізацію оброблюючих матеріалів. Однак, кремній-органічні матеріали порівняно дорогі, мають низьку механічну міцність, низьку адгезію до більшості інших матеріалів.

**Поліефірні смоли** – продукти поліконденсації різних спиртів і кислот (або їхніх ангідридів). Велике практичне значення мають ненасичені поліефірні смоли – продукти поліконденсації багатоатомних спиртів з ненасиченими кислотами або їх ангітридами. Ці смоли широко застосовуються для виготовлення термореактивних компаундів, для ізоляції електричних машин і апаратів, як зв'язуючий матеріал у виробництві шаруватих пластиків тощо. Мають хороші електроізоляційні властивості і високу нагрівостійкість.

**Поліамідні смоли** є термопластичними, мають відносно високу механічну міцність і еластичність. Розчинні лише в обмеженому числі розчинників (зокрема, у крезолі і розплавленому фенолі).

Поліаміди застосовуються для виготовлення синтетичних волокон, гнучких плівок і пластичних мас. Гігроскопічні і пластичні (при підвищених температурах), однак мають низьку радіаційну стійкість і світлостійкість. До числа цих смол належать капрон (силон, дедерон), нейлон.

**Полііміди** – належать до найбільш стійких до нагрівання органічних полімерів (до 300 °С, а короткочасно й до 500 °С). Поліімідні плівки застосовують у конденсаторах, кабельних виробках, ізоляції електричних машин, в мікросхемах.

**Каніфоль** – крихка, склоподібна, аморфна, сильнополярна маса коричневого кольору природного походження. Входить до складу смол хвойних дерев і отримується як залишок після відгону із них летючих частин.

Каніфоль розчиняється в органічних розчинниках (спирті, бензолі, скипидарі), не розчиняється у воді. Температури пом'якшення і плавлення залежать від складу і коливаються в межах 50÷70 °С і 100÷120 °С відповідно. Складається з суміші смоляних кислот (80÷95%) та ненасичених кислот, основна з яких – абієтинова кислота ( $C_{19}H_{29}COOH$ ).

Електроізоляційні властивості каніфолі:  $\rho = 10^{12}$  Ом·м,  $E_{np} = 10\div 15$  МВ/м, залежності  $\epsilon$  і  $tg\delta$  від температури характерні як для полярних діелектриків і показані на рис.2.2.

Каніфоль та її похідні застосовують для проклейки паперу і картону, як емульгатор у виробництві синтетичного каучуку, гум, пластмас, лаків, електроізоляційних мастил і компаундів.

На повітрі каніфоль поступово окислюється, причому температура пом'якшення її підвищується, а розчинність знижується.

Також застосовується при монтажі елементів електрорадіоапаратури в якості флюсу при лудженні та паянні.

Узагальнені основні характеристики синтетичних полімерів подано в додатках табл.Д 2.3-Д 2.5.

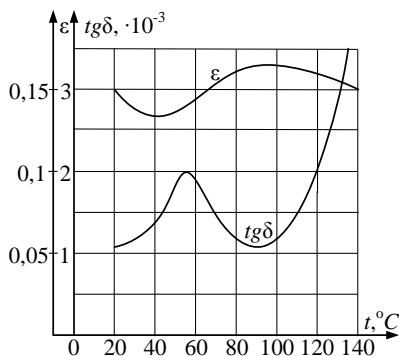


Рис.2.2. Залежності  $\epsilon = \varphi(T)$ ,  $tg\delta = \varphi(T)$  при  $f = 50$  Гц

### 2.3.4. Електроізоляційні лаки і компаунди

Велике значення в електроізоляційній техніці мають лаки і компаунди. У процесі виготовлення ізоляції їх використовують в рідкому стані, але в готовій ізоляції вони є в твердому стані.

**Лаки** – це колоїдні системи на основі природних і синтетичних смол, бітумів, ефірів целюлози і різноманітних їх композицій, які в процесі сушіння після видалення з лаку розчинника, а також в результаті окислення, полімеризації або інших хімічних процесів утворюють лакову плівку.

**Емалі** – це лаки, пігментовані високодисперсними неорганічними з'єднаннями. Використовуються в основному для покриття поверхонь. Непігментовані лаки, що використовуються для покриття листів електротехнічної сталі в розгалужених магнітопроводах і для емалювання проволочи, також називають емалями.

Плівки таких лаків мають низький питомий поверхневий опір (від  $10^2$  до  $10^{10}$  Ом) і використовуються у виробництві електричних машин на високі робочі напруги для покращення картини електричного поля на границі пазових і лобових частин обмоток.

**Просочувальні лаки** застосовуються для просочування обмоток електричних машин і апаратів, у виробництві лакотканин, гнучких трубок і шарових пластиків. Просочування обмоток здійснюється з метою підвищення вологостійкості і нагрівостійкості ізоляції, покращення її теплопровідності, збільшення механічної та електричної міцності.

Лакова плівка повинна бути достатньо еластичною, щоб допускати розширення і стиск обмоток при коливанні температури і незначну вібрацію провідників під час пуску та зупинки електродвигунів. При просочуванні целюлозних матеріалів такими лаками вони переходять з класу ізоляції *У* в клас *А*.

**Покривні лаки** утворюють механічно міцну, гладку, вологостійку плівку на поверхні твердої ізоляції (часто – на поверхні попередньо просоченої пористої твердої ізоляції). Така плівка підвищує напругу поверхневого розряду і поверхневий опір ізоляції, створює захист лакованого виробу від дії вологи, розчинників і хімічно активних речовин, покращує зовнішній вигляд ізоляції.

**Клеючі лаки** застосовуються для склеювання між собою твердих електроізоляційних матеріалів (наприклад, клейка листів слюди під час виготовлення міканітів) або для приклеювання їх до металу. Поряд з високими електроізоляційними властивостями і

низькою гігроскопічністю (загальні вимоги до всіх електроізоляційних лаків), клеючі лаки повинні забезпечувати високу адгезію до склеюваних матеріалів. Так, при виготовленні гетинаксу і текстоліту лак, що просочує окремі шари паперу або тканини і склеює ці шари один з одним, є одночасно просочувальним і клеючим.

**Масляні лаки** є лаками гарячого сушіння (температура понад 100 °С). Плівки масляних лаків характеризуються великою гнучкістю, але порівняно малими твердістю і гігроскопічністю. Вони порівняно швидко старіють при підвищеній температурі і доступі повітря за рахунок подальшого окислення. Розчинниками масляних лаків є бензин, скипидар, ксилол і ін. Застосовуються масляні лаки переважно для виробництва лакотканин і лакопаперу, а також деяких марок емальованих проводів. Плівки масляних лаків стійкі проти дії нафтових масел.

**Бітумно-масляні лаки** складаються із суміші чорних і масляних лаків. До складу чорних лаків входять бітуми, які визначають чорний кольор рідкого лаку і лакової основи. Чорні лаки дешевші за масляні, менш гігроскопічні і менш еластичні, більше схильні до впливу розчинників, а при нагріванні схильні до пом'якшення. Тому як електроізоляційні використовують бітумно-масляні лаки. Розчинниками для бітумно-масляних лаків використовують ароматичні вуглеводні (бензол, толуол та ін.), а також скипидар. Бітумно-масляний лак застосовують для виготовлення лакотканин.

**Целюлозні лаки** – це розчини ефірів целюлози. Більша частина целюлозних лаків – лаки холодного сушіння. Ефіроцелюлозні лаки є розчинами відповідного матеріалу в суміші ацетатів із спиртами, плівки їх термопластичні. Ефіри целюлози у виробництві електроізоляційних лаків мають обмежене застосування. Відомі лаки на основі пластифікованої нітроцелюлози, що застосовуються для лакування деяких видів проводів і для забарвлення виробів (нітроемалі), а також лаки на основі пластифікованої етилцелюлози для лакування деяких монтажних проводів і проводів спеціального призначення.

Особливе значення має нітроцелюлозний лак (**нітролак**). Плівки нітролаку механічно міцні, відрізняються блиском, стійкі до дії повітря, вологи, масел. Нітролак погано пристає до металів, тому перед нанесенням нітролаку на метал утворюють шар ґрунтового лаку, що добре пристає до металу, але менш стійкий до впливу повітря, світла, вологи і масел (наприклад, гліфталевого), а

потім шар нітролаку. Нітролаки використовують також для просочування бавовнянопаперових обплетень автомобільних проводів, для захисту гуми від впливу озону, масла, бензину.

У електроізоляційній техніці широко використовують такі основні марки лаків та емалей: алкідностирольні АС-182, АС-0133; епоксидні ЕП-275, ЕП-755; епоксидно-ефірні ЕФ-1219, ЕФ-0188; поліефірні ПЕ-933, ПЕ-955; кремнійорганічні КО-21, КО-916А; алкідні ПФ-133, ПФ-0203; гліфталево-масляні ГФ-95, ГФ-230; бакелітові ЛБС-1, ЛБС-2; поліуретанові УР-277, УР-1161 та інші.

**Компаунди** – просочувальні і заливні системи, що не містять розчинника і в момент застосування за нормальної чи підвищеної температури знаходяться в рідкому стані, а після застосування в результаті охолодження затвердівають. Внаслідок відсутності розчинників компаунди краще за лаки забезпечують герметизацію вузлів і деталей електричних апаратів і радіоапаратури. Застосування заливних компаундів дає змогу захистити ізоляцію від вологи і хімічно діючих речовин, збільшення розрядної напруги, покращення умов тепловідводу тощо.

В кабельній техніці велике значення мають кабельні компаунди. До них належать:

– просочувальні компаунди (просочувальні кабельні маси), що служать для просочування паперової ізоляції силових кабелів і виготовляються з нафтового масла, до якого для підвищення в'язкості додають каніфоль або синтетичні смоли;

– заливні компаунди (заливні кабельні маси) застосовуються для заливки з'єднувальних, розгалужувальних і кінцевих муфт. Заливка компаундом кінців кабелів у муфтах дає змогу усунути можливість потрапляння вологи в ізоляцію і підвищення пробивних напруг між окремими жилами кабелю і корпусом муфти.

Описані компаунди є термопластичними. Поряд з термопластичними компаундами широко застосовуються й термореактивні компаунди, зокрема, епоксидні та поліефірні на основі органічних матеріалів. Властивості таких компаундів описані в п.2.3.1.

### **2.3.5. Волокнисті та текстильні діелектрики**

В електрорадіотехніці широко застосовуються волокнисті матеріали, тобто матеріали, що складаються переважно з частинок видовженої форми – волокон. В деяких матеріалах, особливо у текстильних, волокниста будова абсолютно очевидна. В інших

волокнистих матеріалах, таких як дерево, папір, картон, волокниста будова може бути досліджена з допомогою мікроскопа при незначному збільшенні.

Переваги багатьох волокнистих матеріалів: дешевизна, висока механічна міцність і гнучкість, зручність обробки. Недоліками є невисока електрична міцність і теплопровідність (через наявність проміжків між волокнами, заповненими повітрям). Гігроскопічність більш висока, ніж у масивного матеріалу того ж хімічного складу. Властивості волокнистих матеріалів можуть бути суттєво підвищені шляхом просочування.

Значна частина волокнистих матеріалів – органічні речовини. До них відносять матеріали рослинного походження (дерево, бавовнянопаперове волокно, папір, целюлоза), шовк, шерсть, штучні та синтетичні волокна.

Целюлозні волокнисті матеріали мають порівняно високу гігроскопічність, що пов'язано як з їх хімічною природою, яка містить значну кількість гідроксильних груп, так і з особливостями будови рослинних волокон, а також невисокою нагрівостійкістю. Деякі штучні синтетичні волокнисті матеріали мають значно меншу гігроскопічність і підвищену нагрівостійкість в порівнянні з целюлозними матеріалами.

В тих випадках, коли вимагається особливо висока робоча температура, яку органічні волокнисті матеріали забезпечити не можуть, застосовують неорганічні волокнисті матеріали на основі скляного волокна і азбесту.

**Папір і картон** – це листовий або рулонний матеріал коротковолокнистої будови, що складається в основному із целюлози. Під час виготовлення паперу, який застосовується в якості електричної ізоляції, використовується сульфатна і натронна целюлоза, що отримується шляхом варіння деревини в розчинах, що містять їдкий натрій  $NaOH$ .

В електрорадіотехніці використовується кабельний, конденсаторний та телефонний папір.

**Кабельний папір** випускається різних марок, що позначаються буквами К, КМ, КВ, КВУ, КВМ, КВМУ. К – кабельний, М – багатошаровий, В – високовольтний, У – ущільнений. Цифри – від 15 до 240 означають номінальну товщину в мкм. Папір марок К, КМ застосовується для силових кабелів напругою до 35 КВ, КВ і КВУ – 35 КВ і вище, КВМ і КВМУ – 110 КВ і більше. Об'ємна

маса неушільненого кабельного паперу двох різних марок складає 0,76 або 0,87 г/см<sup>3</sup>, а ушільненого 1,09÷1,1 г/см<sup>3</sup>.

Ущільнений папір, що просочений нафтовою оливою, має більш високу діелектричну проникність. У зв'язку з цим в конструкціях кабелів на напругу вище 35 кВ використовується наступна комбінація ущільненого і неушільненого паперу: шари, що знаходяться ближче до жили з ущільненого паперу, а наступні шари – з неушільненого. Така комбінація забезпечує рівномірний розподіл електричного поля в ізоляції.

В паперовій ізоляції силового кабелю слабкими місцями – джерелами розвитку пробою є зазори між окремими стрічками паперу в кожному витку. В кабелях із в'язким просочуванням (наприклад, масляно-каніфольним компаундом) в експлуатації після багатократних нагрівань і охолоджень кабелю частина зазорів, що ближчі до жили, є незаповнені просочувальним компаундом. В цих зазорах виникає іонізація, яка руйнує як компаунд, так і папір, і здатна викликати розряд між жилою та свинцевою оболонкою кабелю.

Старіння кабельної ізоляції змушує приймати для кабелів з в'язким просочуванням невисоку робочу довготривалу напруженість електричного поля, що дорівнює 3÷4 МВ/м. Кабелі такого типу використовують лише при невеликих робочих напругах, що не перевищують 35 кВ. При більш високих напругах застосовують масло – і газонаповнені кабелі, в яких робоча напруженість електричного поля доходить до 10÷12 МВ/м.

**Конденсаторний папір** є важливим матеріалом: в просоченому вигляді він використовується як діелектрик паперових конденсаторів. На рис.2.3 показано залежність  $\text{tg}\delta = f(T)$  для конденсаторного паперу, просоченого компаундом (80 % каніфолі і 20 % трансформаторної оливи).

Випускається двох видів: КОН – звичайний конденсаторний папір та силкон – папір для силових конденсаторів. За об'ємною масою розрізняють такі марки: 0,8 (тільки силкон), 1 і 2. Маркування цифр означає густину в г/см<sup>3</sup>.

Товщина різних марок цих паперів – від 4 до 30 мкм.

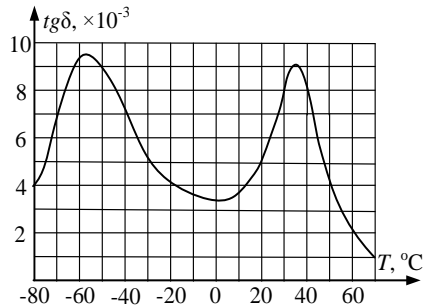


Рис.2.3. Залежність  $\text{tg}\delta = f(T)$

Мала товщина конденсаторного паперу дає змогу отримати високу питому ємність конденсатора, оскільки в першому наближенні, при невисоких робочих напругах питома ємність обернено пропорційна квадрату товщини діелектрика.

Як вже відмічалось, папір використовується в конденсаторі в просоченому вигляді. Тому досить важливо мати розрахункові формули, що дають змогу визначити електроізоляційні властивості ( $\epsilon$ ,  $tg\delta$ ,  $E_{np}$ ) просоченого паперу, виходячи із заданих властивостей паперу і просочувального складу. Такі формули отримав В.Т. Ренне, виходячи з еквівалентної схеми діелектрика, що передбачає послідовне з'єднання шарів целюлози, просочувальної маси і повітря, яке залишилося в порах паперу:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_2}{x(1-y) \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + x(y\epsilon_2 - 1) + 1}. \quad (2.3)$$

Тут позначено:  $\epsilon_1$  – діелектрична проникність просочувальної маси;  $\epsilon_2 = 6,6$  – діелектрична проникність целюлози;  $x = 1 - \rho_1/\rho_2$  – об'ємний вміст пор в непросоченому папері ( $\rho_1$  – об'ємна маса сухого непросоченого паперу,  $\rho_2 = 1,55 \text{ г/см}^3$  – густина целюлози);  $y$  – об'ємна усадка просочувальної маси.

При просочуванні рідким діелектриком, що повністю витісняє повітря з пор паперу, ця формула спрощується, оскільки в ній можна прийняти  $y = 0$ . Ще більш спрощується формула для розрахунку  $\epsilon$  сухого непросоченого паперу, так як в цьому випадку не тільки  $y = 0$ , але й  $\epsilon_1 = 1$ .

У якості діелектрика силових конденсаторів поряд з конденсаторним папером застосовуються синтетичні плівки. Доволі перспективною для цієї цілі є неполярна поліпропіленова плівка, що має малий  $tg\delta$  при досить високій нагрівостійкості.

Існують і паперово-плівкові конденсатори, діелектрик яких складається з двох шарів – паперу і плівки. При цьому папір грає роль гнота, яким у процесі просочування проникає в глибину конденсатора просочувальна маса.

**Картон** відрізняється від паперу більшою товщиною і застосовується в якості електричної ізоляції тільки в просоченому вигляді. Просочування картону здійснюється, як правило, трансформаторною оливою, рідше – синтетичними рідинами, що дає змогу



збільшити його електричну міцність. Картони, що використовуються на повітрі, просочуються лаками або компаундами.

**Текстильні матеріали** виробляють методами прядіння з довговолокнутої сировини. За інших рівних умов текстильні матеріали (тканини, стрічки) мають більш високу механічну міцність, ніж волокнисті, особливо при перегині і при стиранні, але просочені вироби з них дорожчі і мають нижчу електричну міцність, ніж просочений папір. В електроізоляційній техніці пряжу (тобто нитки, скручені з окремих волокон) застосовують для ізоляції провідників шляхом обмотування й обплетення. Тканини і стрічки зазвичай використовують для захисту основної ізоляції електричних машин і апаратів від зовнішніх механічних впливів. Тканини використовують також у виробництві лакотканей і шаруватих пластиків типу **текстоліту**.

**Натуральний шовк** має товщину  $0,07 \div 0,08$  мм, завдяки чому його застосування дає можливість одержувати більш тонку ізоляцію, ніж з бавовни, однак шовк дорожчий бавовняного волокна.

**Штучний шовк** – є результатом переробки ефірів целюлози. На відміну від вихідної целюлози (клітковини) її ефіри мають високу розчинність у відповідних розчинниках і дають змогу виготовляти з них тонкі нитки при видавлюванні розчинів через отвори малого діаметру.

**Лакотканина** – гнучкий електроізоляційний матеріал, що є тканиною, просоченою електроізоляційним лаком. Тканина забезпечує значну механічну міцність, а лакова плівка – електричну міцність матеріалу. Як основу для виготовлення лакотканин найчастіше застосовують бавовняну або шовкову тканини.

### 2.3.6. Пластмаси. Шарові пластики

**Пластмаси** (пластики) характеризуються здатністю під впливом зовнішнього тиску (часто при одночасному нагріванні) набувати певної форми, відповідної контурам *прес-форми*, що використовується для виготовлення чи пресування виробів.

Пластмаси широко застосовують в електрорадіотехніці як електроізоляційні, так і конструкційні матеріали. Багато пластмас мають високу механічну міцність, малу густину і хороші електроізоляційні властивості. В більшості випадків пластмаси складаються з двох основних компонентів: зв'язувача і наповнювача.

*Зв'язувач* – зазвичай органічний полімер, що володіє здатністю деформуватися під впливом тиску. Іноді застосовується неорганічний зв'язувач, наприклад, скло в мікалексі, цемент в азбоцементі.

*Наповнювач* міцно зчеплюється з речовиною, що зв'язує і може бути порошкоподібним, волокнистим, листовим (бавовняне, азбестове або скляне волокно, слюда, папір, тканина тощо). Наповнювач суттєво здешевлює пластмасу і в той же час може покращувати її механічні характеристики (збільшувати міцність, зменшувати крихкість). Гігроскопічність і електроізоляційні властивості в результаті введення наповнювача можуть погіршуватися, тому в пластмасах, від яких вимагаються високі електроізоляційні властивості, наповнювач найчастіше відсутній.

До складу пластмас іноді вводять *пластифікатори*, що збільшують пластичність матеріалу, та *фарбники*, що надають пластмасі певне забарвлення, та інші добавки.

Широке застосування в якості конструкційних та електроізоляційних матеріалів мають шарові пластики, в яких наповнювачем є той чи інший листовий волокнистий матеріал. Сюди відносять гетинакс, текстоліт, склотекстоліт.

*Гетинакс* отримується шляхом гарячого пресування паперу, що просочений термореактивною смолою – бакелітом. Для виробництва гетинаксу використовується міцний та нагрівостійкий просочений папір.

Електрична міцність гетинаксу в напрямі, що перпендикулярний до шарів,  $E_{np} = 20 \div 40$  МВ/м, діелектрична проникність  $\epsilon = 5$ . Дугостійкість гетинаксу, як і інших пластиків, – невисока: після дії розряду на поверхні матеріалу лишаються сліди вуглецю, що володіють високою електропровідністю. Шарова структура гетинаксу приводить до помітної анізотропії властивостей у напрямках, що перпендикулярні та паралельні шарам. Так, питомий опір гетинаксу вздовж шарів у  $50 \div 100$  разів, а електрична міцність вздовж шарів у  $5 \div 8$  разів нижча, ніж впоперек шарів. Гетинакс застосовується у високо- та низьковольтному приладобудуванні, а також у техніці зв'язку.

*Текстоліт* – шаровий пластик, у якому в якості наповнювача використовують не папір, а бавовняну тканину, що просочена термореактивною смолою. Текстоліт значно дорожчий гетинаксу. Він має підвищені питому ударну в'язкість, опір до розколювання і стійкість до стирання. Його застосовують як конструкційно-ізоля-

ційний матеріал для виробів, що піддаються ударним навантаженням або таких, які працюють на стирання (деталі перемикачів).

**Склотекстоліт** є шаровим пресованим матеріалом, що складається з двох чи більше шарів склотканини, просоченої терморезистивними зв'язуючими. Склотекстоліт володіє підвищеною вологостійкістю та кращими електричними і механічними параметрами, які в порівнянні з гетинаксом і текстолітом, але гірше оброблюється механічно.

**Фольговані матеріали** – шарові пластики або синтетичні плівки, фанеровані з одного або з обох боків металевою, зазвичай мідною, фольгою. Вони застосовуються для виготовлення електронних плат в різних електротехнічних і радіоелектронних пристроях, а також для виготовлення мікромашин з печатними схемами замість звичайних обмоток.

В таблиці 2.5 подані основні параметри шарових пластиків.

Табл.2.5.

Параметр Назва	$\rho$ , Ом·м	$\epsilon$	$E_{np}$ при товщині 3 мм, МВ/м	Теплостійкість, °С	Густина, г/см <sup>3</sup>	$tg\delta$
Гетинакс	$10^{10} \div 10^{11}$	5÷6	25÷35	190	1,35÷4	$20 \cdot 10^{-2}$
Текстоліт	$10^8 \div 10^{10}$	6÷7	5÷8	155	1,3÷1,45	$8 \cdot 10^{-2}$
Склотекстоліт	$10^8 \div 10^{12}$	5÷7	17÷25	240	1,6÷1,9	$3 \cdot 10^{-2}$

### 2.3.7. Еластомери. Гума

Велике значення в найрізноманітніших галузях техніки і в побуті мають матеріали на основі каучуку і близьких до нього за властивостями речовин. Ці речовини називають еластомерами.

**Натуральний каучук** отримують з особливих рослин – *каучуконосів*. За хімічним складом натуральний каучук є полімерним вуглеводнем. Висока еластичність пов'язана із зигзагоподібною формою ланцюжків його молекул. При дії на каучук розтягуючого зусилля форма ланцюжка наближається до прямолінійної. Каучук – аморфна речовина, але в розтягнутому стані він набуває властивостей, що характерні для кристалічних тіл, і має впорядковане розташування молекул у просторі. Після зняття розтягуючого зусилля він знову набуває властивостей аморфного тіла. Через стійкість до дії як підвищених, так і знижених температур, а

також розчинників чистий каучук для виготовлення електричної ізоляції не вживають. Для усунення вказаних вище недоліків його піддають так званій *вулканізації*, тобто нагріванню після введення в нього сірки. При вулканізації відбувається утворення просторової структури.

Вулканізація покращує як нагрівостійкість, так і холодостійкість каучуку, підвищує його механічну міцність і стійкість до розчинників. Залежно від кількості сірки, що додається до каучуку, при вулканізації отримують різні продукти: м'яку гуму (1÷3% сірки), що має високі видовження і пружність, та тверду гуму (ебоніт), що містить 30÷35% сірки і володіє високою стійкістю до ударних навантажень.

Крім каучуку і сірки, при виготовленні гуми і ебоніту до складу гумової суміші додають різні *наповнювачі* (крейду, тальк тощо), а також *фарбники*, *каталізатори* (прискорювачі) процесу вулканізації та інші речовини.

*Гуму* широко застосовують в електропромисловості для ізоляції монтажних проводів, гнучких переносних проводів і кабелів. Вона застосовується також для виготовлення захисних рукавичок, діелектричних калош, килимків та ізоляційних трубок. До недоліків гуми як електроізоляційного матеріалу слід віднести низьку нагрівостійкість (при нагріванні гума старіє, стає крихкою і тріскається), малу стійкість до дії нафтових масел та інших неполярних рідин, в яких гума набухає (бензол, бензин та ін.), малу стійкість до дії світла, особливо ультрафіолетового. Також погіршує властивості гуми озон, що утворюється при іонізації в повітряних включеннях або в навколишньому повітрі.

Останнім часом широко застосовують тіурамову гуму, при виготовленні якої беруть не чисту сірку, а *тіурам* – органічну сірчисту сполуку, що при нагріванні забезпечує вулканізацію каучуку. Тіурамова гума не містить вільної сірки, і тому її можна накладати безпосередньо на мідь. Крім того, тіурамова гума володіє вищою нагрівостійкістю.

Гуми, в яких наповнювачем є сажа, мають чорний колір, вони володіють хорошими механічними властивостями, але електроізоляційні властивості їх низькі. Тому такі гуми в електротехніці використовують лише в тих випадках, коли від них не потрібні високі електричні властивості.

**Синтетичний каучук** отримують зі спирту, нафти і природного газу. У кабельній промисловості гуми для захисних оболонок виготовляються виключно на основі синтетичного каучуку.

**Бутадієновий каучук (ескапон)** отримують полімеризацією газоподібного вуглеводню бутадієну. На основі ескапону виготовляється цілий ряд електроізоляційних матеріалів (лаки, лакотканини, компаунди і т.д.). Він нагрівостійкий і малосхильний до дії кислот та органічних розчинників, має високі електроізоляційні властивості, що пояснюється неполярною природою цього просторового полімеру.

**Бутадієн-стірольний каучук** отримують при сумісній полімеризації бутадієну і стиролу. За електроізоляційними властивостями він наближається до натурального каучуку. Володіє підвищеними нагрівостійкістю та маслостійкістю.

**Кремнійорганічні каучуки** в основі будови молекули мають полісилоксановий ланцюжок. Вони вулканізуються лише при введенні спеціальних добавок, наприклад, органічних перекисів. Кремнійорганічні каучуки володіють високою нагрівостійкістю, задовільною холодостійкістю при високих електроізоляційних властивостях, але мають невисокі механічні властивості, малостійкі до дії розчинників і досить дорогі.

## 2.4. Тверді неорганічні діелектрики

### 2.4.1. Неорганічне скло як ізоляційний матеріал

**Скло** – неорганічна квазіаморфна речовина, що представляє складну систему різноманітних оксидів. Властивості скла змінюються в широких межах в залежності від їх складу і режиму теплової обробки. Так, за нормальної температури питомий опір скла становить  $\rho = 10^6 \div 10^{15}$  Ом·м,  $\epsilon = 4 \div 25$ ,  $tg\delta = 0,0002 \div 0,01$ .

Скло отримується під час швидкого охолодження розплавленого матеріалу. Сировинні матеріали: кварцевий пісок  $SiO_2$ , сода  $Na_2CO_3$ , вапно  $CaCO_3$ , доломіт  $CaCO_3 \times MgCO_3$ , сульфат натрію  $Na_2SO_4$ , борна кислота  $H_3BO_3$ , подрібнюють, зважують в потрібних пропорціях, перемішують і завантажують в склоплавильну піч.

Межа міцності скла при розтягу невелика (100÷300 МПа) і збільшується з підвищенням вмісту в ньому оксидів кремнію  $SiO_2$  і кальцію  $CaO$ . Лужні оксиди понижують міцність скла.

З теплових властивостей скла найбільше значення мають температура пом'якшення і температурний коефіцієнт лінійного

розширення. Температура пом'якшення для скла різного складу коливається від 350 до 1700<sup>0</sup>С. Найбільш тугоплавким є кварцове скло. Температурний коефіцієнт лінійного розширення скла змінюється від  $5,5 \cdot 10^{-7}$  до  $150 \cdot 10^{-7}$  К<sup>-1</sup>. Він відіграє важливу роль при спаюванні і зварюванні одне з одним різних видів скла, при спаюванні скла з металом, при нанесенні склоемалі на ту чи іншу поверхню. Необхідно, щоб  $TK_l (\alpha_l)$  скла і з'єднуваних з ним матеріалів були приблизно однаковими, інакше при зміні температури може виникати розтріскування скла.

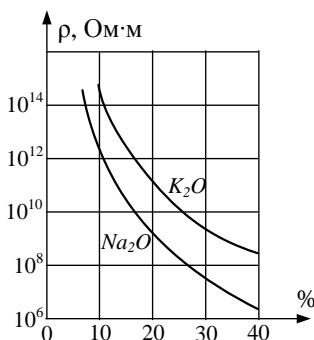


рис.2.4.

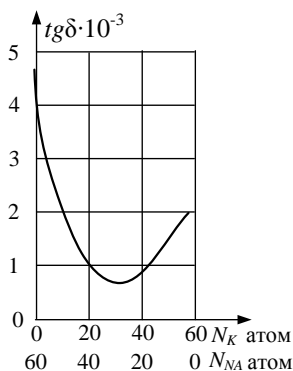


рис.2.5.

Рис.2.4. Залежність  $\rho$  скла  $SiO_2-Na_2O$  і  $SiO_2-K_2O$  від складу. По осі абсцис вміст відповідного лужного оксиду в процентах по масі (все інше –  $SiO_2$ )

Рис.2.5. Залежність  $tg\delta$  скла системи  $B_2O_3-Na_2O-K_2O$  від складу. По осі абсцис – число молекул натрію і калію на 100 молекул оксиду барію

В залежності від призначення розрізняють такі види скла: конденсаторне, ізоляторне та склоемалі.

**Конденсаторне скло** використовується в якості діелектрика конденсаторів, що застосовуються у високочастотних фільтрах, імпульсних генераторах, коливальних контурах високочастотних пристроїв. За можливостями вони повинні мати підвищену  $\epsilon$  і якнайменший  $tg\delta$ . Використовується для ізоляції ввідів у деякі типи конденсаторів, терморезисторів, у напівпровідниковому виробництві для виготовлення ізоляторів у металічних корпусах „таблеткового” типу, ізоляторів у потужних пристроях, у корпусах транзисторів.

**Склоемаліями** називають покриття, що наносять на поверхню виробів з метою захисту від корозії. Їх застосовують для утворення електричної ізоляції трубчастих резисторів, у яких на зовнішню поверхню керамічної трубки нанесена проволочна обмотка з

ніхрому чи константану, на яку наноситься шар емалі, що ізолює окремі витки і захищає обмотку від вологи, забруднення і окислення киснем повітря при високій робочій температурі (приблизно 300 °С). Крім того, склоемалі використовуються в електроапаратуробудуванні для отримання міцного і нагрівостійкого електроізоляційного покриття на металі, а також для пристроїв вводу в металеві вакуумні прилади. Склоемалі також застосовуються як діелектрик в деяких типах конденсаторів.

**Скловолокно** виготовляють з розплавленого лужного, алюмосилікатного, безлужного або малолужного алюмоборосилікатного скла. Тонкі скляні волокна діаметром приблизно 5 мкм мають настільки високу гнучкість, що можуть оброблятися способами текстильної технології. Зі скляних ниток, скручених з волокон, виготовляють скляні тканини, стрічки тощо. Перевагами скляної волоконної ізоляції перед ізоляцією з органічних волокон є висока нагрівостійкість, значна механічна міцність, відносно мала гігроскопічність і високі електроізоляційні властивості.

Для передачі світла між джерелом і приймачем випромінювання використовують світловоди – тонкі скляні волокна. Окремі волокна можуть бути з'єднані у світлові кабелі із внутрішніми світловолоконними світлоізолюючими покриттями [15].

Сукупність методів і засобів передачі світлової інформації за допомогою надтонких волокон отримала назву волоконної оптики, що на сьогодні є важливою складовою оптоелектроніки. Волоконні пристрої (рис.2.6) відрізняються компактністю й надійністю.

Суттєвим моментом є закрита передача інформації й висока завадостійкість оптичного каналу зв'язку. Світловоди каналізують світло від джерела до приймача інформації за рахунок ефекту багаторазового повного внутрішнього відбиття. За допомогою волоконних кабелів легко здійснюється перетворення оптичного зображення та його кодування.

Світлові кабелі можуть підсилювати освітленість об'єктів

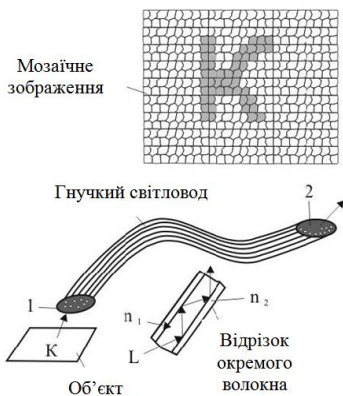


Рис.2.6. До принципу дії світловоду

за рахунок концентрації світлового потоку, зменшувати або збільшувати зображення.

Спеціальні технології – монтаж плівок на підкладку, іонне легування дають змогу виготовляти плоскі світловоди для оптичних інтегральних мікросхем.

**Ситали** – склокристалічні матеріали, що отримуються шляхом повної кристалізації стекел спеціально підбраного складу. Вони займають проміжний стан між звичайними стеклами і керамікою, характеризуються підвищеною механічною міцністю та широким діапазоном зміни коефіцієнта лінійного розширення, високу теплопровідність і задовільні електричні характеристики, стійкі до дії кислот, лугів. Типові параметри ситалів приведені в таблиці 2.6.

Табл.2.6.

Параметр	Значення
Густина $D$ , г/см <sup>3</sup>	2,3÷2,8
Температурний коефіцієнт лінійного розширення $TK_l(\alpha_l)$ , К <sup>-1</sup>	$(12\div 120)\cdot 10^{-7}$
Питома теплопровідність $\gamma$ , Вт/м·К	0,8÷2,5
Температура текучості $t_{мек}$ , °С	750÷1350
Питомий об'ємний опір $\rho$ , Ом·м	$10^8\div 10^{12}$
Електрична міцність $E_{мп}$ , МВ/м	25÷75
$tg\delta$ при $f = 10^6$ Гц	$(10\div 800)\cdot 10^{-4}$
Границя міцності при згині $\sigma_{зг}$ , МПа	50÷260

Ситали широко використовуються як підложки гібридних інтегральних мікросхем та дискретних тонкоплівкових резисторів. Доступність сировини і проста технологія забезпечують невисоку вартість таких виробів.

### 2.4.2. Керамічні діелектричні матеріали

**Керамічними матеріалами** називають неорганічні матеріали, з яких можуть бути виготовлені вироби тієї чи іншої форми шляхом спікання неорганічних солей з мінералами та оксидами металів. Керамічні матеріали представляють собою багатофазну систему і включають в себе кристалічну, склоподібну і газову фази. Основною фазою є кристалічна. Склоподібна фаза являє собою прошарки скла, що зв'язують кристалічну фазу. Газова фаза в кераміці (пори, мікротріщини) небажана і її наявність призводить до зниження механічних та електричних властивостей матеріалу.



Керамічні матеріали нагрівостійкі, володіють високими електричними властивостями, механічно міцні, стабільні і надійні в експлуатації. Перевагою кераміки перед іншими матеріалами є можливість отримання раніше заданих електрофізичних параметрів матеріалу зміною вихідного складу маси і технології виробництва виробів.

Керамічні матеріали можуть бути досить різноманітними за властивостями і сферою застосування. В електрорадіотехніці використовують керамічні матеріали в якості напівпровідникових і магнітних матеріалів. Надзвичайно велике значення мають керамічні діелектричні матеріали, інколи електроізоляційні, а також сегнетоелектричні керамічні матеріали. Багато керамічних матеріалів володіють низькими значеннями кута діелектричних втрат, високою нагрівостійкістю. В порівнянні з органічними електроізоляційними матеріалами вона є більш стійкими до електричного і теплового старіння.

Керамічні матеріали в залежності від призначення виготовляються таких типів: **A** – високочастотні для конденсаторів; **B** – низькочастотні для конденсаторів; **B** – високочастотні для виробів та інших радіотехнічних деталей. Для кожного типу виготовляють матеріали різних класів та груп з визначеними технічними показниками.

Кераміка типу **A** характеризується високим вмістом кристалічної фази і невеликим вмістом безлужної аморфної фази. Кристалічну фазу формують згідно з температурним коефіцієнтом діелектричної проникності  $TK_\epsilon(\alpha_\epsilon)$ , щоб отримати найбільше значення діелектричної проникності і низьке значення кута діелектричних втрат. Сюди відносять стронцієву кераміку на основі титанату стронцію  $SrTiO_3$ , що використовується для виготовлення високочастотних конденсаторів, до яких не ставлять вимог стабільності ємності. Кераміка цього типу використовується для виготовлення контурних, розділюючих і термокомпенсуючих конденсаторів. У термокомпенсуючих конденсаторів ємність знижується при підвищенні температури. Свою назву такий конденсатор отримав тому, що його використовують для термокомпенсації частоти контуру, що визначається виразом  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , в якому індуктивність  $L$  підвищується з ростом температури. Оскільки кераміка даного типу ділиться на декілька класів, то її електрофізичні параметри змінюються в широких межах.

Кераміка типу **Б** відрізняється високими діелектричною проникністю та діелектричними втратами. Сюди належить *СВТ*-кераміка (стронцій-вісмут-титан). Її кристалічна фаза утворена твердими розчинами титанатів стронцію  $SrTiO_3$  і вісмуту  $Bi_4Ti_3O_{12}$ .

Кераміка типу **В** використовується для виготовлення різних установочних деталей радіоелектронної апаратури, що працюють в полях високої частоти і разом з тим несуть механічне навантаження.

Середні характеристики типів кераміки наведені в таблиці 2.7.

Табл.2.7.

Тип кераміки Параметр	<b>А</b>	<b>Б</b>	<b>В</b>
$\epsilon$	14÷250	900÷9800	6÷10
$\rho$ , Ом·м	$10^{12}$	$10^{11}$	$10^{14} \div 10^{17}$
$E_{np}$ , МВ/м	6÷35	5÷25	20÷45
$tg\delta$	$6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$(0,1 \div 2) \cdot 10^{-3}$

**Фарфор** з початку розвитку електротехніки широко використовувався як електроізоляційний матеріал. Для виготовлення фарфору застосовують спеціальні сорти глини і кварц  $SiO_2$ . Суть технологічного процесу виготовлення фарфору зводиться до очистки від домішок всіх складових, ретельного їх подрібнювання і перемішування в однорідну масу з водою. Відформовані ізолятори сушать для видалення вологи.

**Глазур** – маса, що наноситься у вигляді водної суспензії тонким шаром на поверхню фарфорового виробу. Вона захищає фарфор від проникнення вологи, що дає змогу працювати ізоляторам у відкритих установках. З іншого боку, глазур, заглажуючи тріщини та інші дефекти на поверхні фарфору, які є місцями початку руйнування під час механічних навантажень, суттєво підвищує механічну міцність фарфорових виробів. Температура пом'якшення глазуру дещо нижча температури обпалювання, щоб в момент обпалювання вона вже плавилась і добре покривала поверхню фарфору. Глазур повинна мати температурний коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha_l$  близький до  $\alpha_l$  фарфору, інакше вона при змінах температури буде розтріскуватись. Основними електричними характеристиками ізоляторів є розрядна напруга.

**Стеатитова кераміка** широко використовується для виготовлення елементів корпусів напівпровідникових пристроїв та схем, а також в якості високочастотного матеріалу для виробництва

прохідних ізоляторів, опорних плит, підкладок, ізоляційних кілець. Виготовляється на основі мінералу  $3MgO \times 4SiO_2 \times H_2O$ , тобто силікату магнію. Перевагою стеатитової кераміки є мала усадка при обпалюванні, що дозволяє отримувати вироби точних розмірів. До того ж така кераміка не потребує глазурування і може порівняно легко додатково оброблятися шліфівкою.

Стеатит широко використовується для монтажної ізоляції в радіотехнічній апаратурі, а також і в силовій електротехніці.

Основні параметри керамічних матеріалів зведено в таблиці 2.8.

Табл.2.8.

Параметр	Фарфор	Стеатитова кераміка
Густина, Мгр/м <sup>3</sup>	2,5÷3,3	2,7
$TK_f, K^{-1}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$
$\rho$ , Ом·м при: 20 °С	$10^{12} \div 10^{13}$	$10^{13}$
100 °С	$10^8 \div 10^9$	$5 \cdot 10^{11}$
300 °С	$10^4 \div 10^5$	$5 \cdot 10^7$
Діелектрична проникність $\epsilon$	6÷7	6÷6,5
Електрична міцність $E_{np}$ , МВ/м	20÷28	20÷25
$tg\delta$ при: 20 °С / 100 °С	0,035 / 0,12	0,002 / 0,003

**Радіофарфор, ультрафарфор** – це фарфор, склоподібна фаза якого змінена введенням в ній важкого оксиду барію  $BaO$ . Виготовляється різних марок і є подальшим удосконаленням фарфору, характеризується великим вмістом оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ . У радіофарфору  $tg\delta$  значно менший, а питомий опір  $\rho$  більший, ніж у звичайного електротехнічного фарфору. Крім того, ультрафарфор має суттєво підвищену в порівнянні із звичайним фарфором механічну міцність.

**Глиноземиста кераміка (алюмін оксид)** в основному складається з оксиду алюмінію (глинозему)  $Al_2O_3$ . Цей матеріал, що вимагає складної технології виготовлення, з високою температурою випалення (до 1750 °С), володіє високою нагрівостійкістю (робоча температура до 1600 °С), високим  $\rho$  і малим  $tg\delta$  при підвищених температурах, надзвичайно високою механічною міцністю і теплопровідністю (в  $10 \div 20$  разів вищою, ніж у фарфору).

**Тальк** відомий мінерал, що має здатність завдяки його надзвичайній м'якості легко розмелюватися в порошок. Стеатитова кераміка зазвичай виготовляється випаленням маси, що складається з порошку тальку з деякими добавками.

**Кераміка особливо високої нагрівостійкості** застосовується для роботи при високих температурах і різких змінах температури. Сюди відносять спеціальні види керамічних матеріалів на основі мінералу кордиєриту  $2MgO \times 2Al_2O_3$ , титанату алюмінію  $Al_2O_3 \times TiO_2$ .

Значний інтерес представляють **чисті оксиди** різних металів, які мають високу нагрівостійкість. Ряд оксидів володіє також надзвичайно високою для електроізоляційних матеріалів теплопровідністю (оксиди берилію  $BeO$ , магнію  $MgO$  і алюмінію  $Al_2O_3$ ). Характерно, що оксид берилію має теплопровідність вищу, ніж металевий берилій. Кераміка з  $BeO$  застосовується в тих випадках, коли основною вимогою до електроізоляційного матеріалу є особливо висока теплопровідність.

**Безоксидні керамічні матеріали** – нітриди, карбіди, силіциди, бориди і їх композиції. Деякі з них є напівпровідниками (карбід кремнію  $SiC$ ), а деякі діелектриками. Електроізоляційними матеріалами високої нагрівостійкості є нітрид бору  $BN$ , кремнію  $Si_3N_4$  та ін. Такі матеріали можуть використовуватись при високих температурах, але в нейтральному або відновному середовищах.

### 2.4.3. Мінеральні діелектрики

**Слюда** – це мінерал з кристалічною структурою, який легко розчеплюється на пластинки товщиною до 5 мкм. Завдяки її цінним якостям: високій електричній міцності, нагрівостійкості, вологостійкості, механічній міцності слюду застосовують в якості ізоляції електричних машин високих напруг і потужностей (турбогенератори, гідрогенератори, тягові електродвигуни постійного струму) і як діелектрик – в деяких конструкціях конденсаторів. Не зважаючи на велику кількість різновидів слюд, для електричної ізоляції застосовують тільки дві: мусковит –  $K_2O \times 3Al_2O_3 \times 6SiO_2 \times 2H_2O$  і флогопіт –  $K_2O \times 6MgO \times Al_2O_3 \times 6SiO_2 \times 2H_2O$ .

Слюди є дуже поширеними мінералами і складають 3,8% маси земної кори. Первинна обробка слюди складається з її очистки від домішок. Потім слюду розколюють на пластини товщиною 0,1÷0,6 мм. В подальшому слюду розчеплюють на листки товщиною 5÷50 мкм. Таку слюду називають щипаною. Її застосовують для клеючої ізоляції в конденсаторах постійної ємності типів: КСО (конденсатори слюдяні опресовані), КГС (конденсатори слюдяні герметизовані), СГМ (конденсатори слюдяні герметизовані малогабаритні).

Слюда також застосовують у вигляді штампованих виробів для кріплення електричної ізоляції, в якості теплового захисту цоколів потужних електричних ламп накаливання. Слюдяні електроізоляційні матеріали виготовляють на основі пластинок синтетичної слюди. До них відносять мікалекси, міканіти, слюдопласти. На рис.2.7, 2.8 зображено деякі електричні характеристики слюди мусковит.

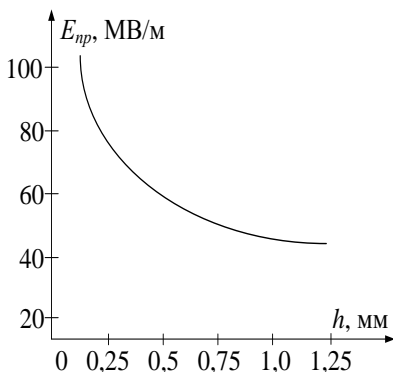


Рис.2.7. Залежність електричної міцності слюди мусковит від товщини пластинки в неоднорідному полі

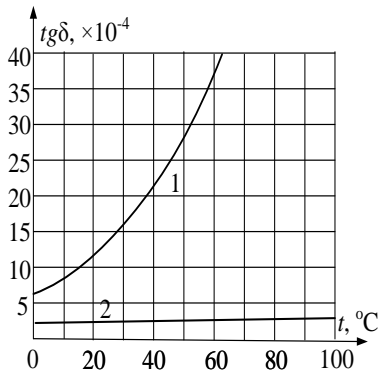


Рис.2.8. Залежність  $tg\delta$  слюди мусковит від температури при частоті 50 Гц (крива 1) і 2 МГц (крива 2)

**Мікалекс** є твердим матеріалом, який отримують шляхом гарячого пресування суміші порошкоподібної природної слюди і легкоплавляного скла. Для виробництва мікалексу застосовують мусковит та борно-свинцеві види скла. Пресування проводять за температури близько 600 °C і тиску 60 МПа. Мікалекс – матеріал, що володіє високою нагрівостійкістю, дугостійкістю, механічною міцністю. Він застосовується для виготовлення ізоляційних матеріалів, деталей коливальних контурів потужних радіопередавачів, каркасів індуктивних котушок, плат перемикачів, різноманітних деталей вакуумних приладів та ін. Так як технологічний процес виготовлення мікалексу складний і потребує спеціальних електричних печей та пресів із нагрівостійкої нержавіючої сталі, то матеріал не набув широкого застосування. Він може бути замінений спеціальними видами керамічних матеріалів.

Міканіти і слюдопласти мають обмежене застосування в радіоелектронних пристроях. Їх відносять до основних видів ізоляції електричних машин і називають слюдяним папером.

Маркування міканіту:

К – колекторний, П – прокладковий, Ф – формувальний, Г – гнучкий, М – мікафолій, Л – мікастрічка. Це перша буква маркування. Друга буква маркування – тип слюди для виготовлення міканіту: М – мусковит, Ф – флогопіт, С – суміш мусковиту і флогопіту. Третя та наступні букви і цифри – вид клеючої речовини і додаткові характеристики матеріалу.

Через високий вміст (не менше 50% слюди за масою) міканіти нагрівостійкі і відносяться до класу ізоляції В. При використанні неорганічних підложок (склотканини) нагрівостійкість зростає із 130 °С (клас В) до більш ніж 180 °С (клас С). Міканіт утворюється просочуванням порошку сухої слюди клеючим розчином.

**Тверді міканіти:** до них відносять колекторний і прокладковий міканіти. Колекторний міканіт застосовують у виді штампованих заготовок, які прокладаються між мідними пластинами колекторів електричних машин постійного струму. Завдяки високому тиску під час пресування цей міканіт має хороші механічні властивості. Це забезпечує міцність колектора під час роботи машини. Товщина – від 0,4 до 1,5 мм.

**Прокладковий міканіт** застосовують для електроізоляційних прокладок, шайб. Виготовляється з мусковиту, флогопіту та їх суміші. Містить від 80% до 97% слюди.

**Формувальні міканіти** за нормальної температури тверді, але при нагріві набувають властивість приймати ту чи іншу форму, яку зберігають і під час охолодження. Їх застосовують під час виготовлення манжетів (ізоляція колектора від валу електричної машини). Товщина – 0,1÷0,5 мм. Вміст слюди – від 80% до 95%, все інше (5÷20%) – зв'язуюча речовина – кремнійорганічна смола.

**Гнучкі міканіти** призначаються для ізоляції різноманітних частин електричних машин (обмотка секцій, пазова ізоляція). Виготовляється з мусковиту чи флогопіту на масляно-бітумному лаці.

Інший різновид гнучкого міканіту – **мікастрічка**. З обох сторін – підкладки із склотканини. Товщина – 0,1; 0,12; 0,15; 0,17 мм. Вона утворює основну ізоляцію обмоток електричних машин. При пересиханні стрічки її необхідно витримати у парах розчинника.

**Нагрівостійкий** (термоупорний) міканіт, що не містить органічних речовин застосовують для ізоляції електронагрівальних приладів та в інших випадках, де температура сягає кілька сот градусів Цельсія. Товщина – 0,2÷1 мм.

**Фторфлогопіт** – синтетична слюда, що має вищу хімічну стійкість, нагрівостійкість, ніж природний флогопіт. За складом фторфлогопіт відрізняється від флогопіту тим, що в ньому гідроксильні групи *ОН* замінені іонами фтору. Виготовлення набагато дорожче, але завдяки високим електричним властивостям є перспективним матеріалом. Застосовується для виготовлення штампованих деталей, що працюють за температури (-200÷800 °С), а також для виготовлення мікалексу, що має вищі властивості, ніж звичайний. Електричні властивості слюдяних матеріалів наведені в таблиці 2.9.

Табл.2.9.

Види слюди	$\rho$ , Ом·м	$\varepsilon$ ( $f = 1$ МГц)	$tg\delta$ ( $f = 1$ МГц)	$E_{np}$ , МВ/м ( $h = 0,025 \div 0,05$ мм)
Мусковит	$10^{12} \div 10^{13}$	6÷8,5	$(1 \div 4) \cdot 10^{-4}$	100÷250
Флогопіт	$10^{11} \div 10^{12}$	5÷7	$30 \cdot 10^{-4}$	70÷150
Фторфлогопіт	$10^{12} \div 10^{14}$	6÷7,5	$3 \cdot 10^{-4}$	100÷400

**Азбест** – назва групи мінералів, що володіють волокнистою будовою. Найбільш поширений тип азбесту – *хризотилевий*, що є волокнистим різновидом мінералу хризотилу  $3MgO \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Перевагою азбесту перед органічними волокнистими матеріалами є висока нагрівостійкість. Його міцність зберігається за температур, при яких звичайні органічні волокна вже повністю руйнуються. Азбест володіє задовільною гігроскопічністю, яка зменшується при просоченні смолами, бітумами тощо. Лише при температурі 400÷500 °С він змінює свою кристалічну структуру і втрачає механічну міцність. Плавиться азбест при температурі вище 1150 °С. Межа міцності при розтягу  $\sigma_p = 30 \div 40$  МПа, однак вигин і механічна обробка азбестових волокон різко понижують його міцність.

Електроізоляційні властивості азбесту невисокі і тому він не застосовується в пристроях високої напруги та високих частот.

Азбест знаходить застосування в різних областях електротехніки. З нього виготовляють пряжу, стрічки, тканини, папери, картони та інші вироби. Азбест, як волокнистий наповнювач входить до складу ряду пластичних мас, збільшуючи тим самим їх нагрівостійкість і механічну міцність в порівнянні з пластмасами на органічному наповнювачі. Азбестовий папір і тканина утворюють основу шарових пластиків – *азбогетинаксу* і *азботекстоліту*.

## 2.5. Активні діелектрики

Основною властивістю звичайних (пасивних) діелектриків є їх здатність поляризуватись в електричному полі. Активні ж діелектрики відрізняються від звичайних тим, що їх електричними властивостями можна керувати в широкому діапазоні, надаючи їм електричну, теплову, магнітну енергію тощо. До них належать сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, електрети, піроелектрики матеріали квантової електроніки, рідкі кристали і т.п.

Останнім часом спостерігається підвищений інтерес до активних діелектриків через їх нові застосування в приладобудуванні й електроніці, а також внаслідок прогресивного розвитку сучасних нанотехнологій. Важливу роль ці матеріали відіграють в інформаційних технологіях та мініатюризації апаратури. Властивості активних діелектриків можуть мати не тільки тверді, але й рідкі і газоподібні діелектрики. За хімічним складом, будовою та властивостями їх відповідно поділяють на органічні та неорганічні, кристалічні та аморфні, полярні й неполярні

Активні діелектрики можна розглядати як матеріали, що дають змогу безпосередньо перетворювати енергію та інформацію. Це давачі температури, тиску, фільтри, модулятори електричних і оптичних сигналів, підсилювачі тощо. Так, п'єзоелектрик перетворює електричну енергію в механічну і навпаки. Піроелектрик – це теплоелектричний (і відповідно електротепловий) перетворювач енергії. Нелінійні діелектричні пристрої дають змогу перетворювати частоту сигналу, виконувати модуляцію і детектування, тобто перетворювати інформацію.

### 2.5.1. Сегнетоелектрики

*Сегнетоелектрики* – це матеріали, які в певному температурному інтервалі без впливу зовнішнього поля мають спонтанну поляризацію, напрям якої можна змінити зовнішнім електричним полем. Сегнетоелектрики характеризуються доменною структурою, для якої характерні макроскопічні області з різним напрямом векторів поляризованості  $\vec{P}$ . За відсутності поля сумарна поляризованість зразка дорівнює нулю. При прикладенні електричного поля дипольні моменти доменів орієнтуються в напрямку поля, що викликає ефект сильної поляризації, а відповідно – високі і надвисокі значення діелектричної проникності.



Залежність поляризованості  $P$  від напруженості зовнішнього електричного поля  $E$  в сегнетоелектрика нелінійна і при циклічній зміні  $E$  має вигляд характерної замкненої кривої, яку називають петлею гістерезису. Якщо зменшувати поле від  $+E_{max}$  до нуля, то зразок залишається поляризованим, але після зміни напрямку поля поляризованість зменшується і при значенні  $-E_c$ , що називають коерцетивною силою сегнетоелектрика, поляризованість  $P = 0$ , потім напрям поляризованості стає додатнім. Площа петлі пропорційна енергії, затраченої полем, тобто діелектричним втратам.

За хімічним зв'язком і фізичними властивостями всі сегнетоелектрики поділяють на дві групи: іонні та дипольні.

Іншим характерним параметром сегнетоелектриків є сегнетоелектрична точка Кюрі – температура, при якій виникає спонтанна поляризація при охолодженні або зникає при нагріванні.

Діелектрична проникність матеріалу за температури в точці Кюрі максимальна. Після досягнення точки Кюрі відбувається фазовий перехід із сегнетоелектричного стану в параелектричний, що призводить до різкого зменшення діелектричної проникності. Перехід в полярний стан може бути наслідком впорядкованого зміщення іонів з положення рівноваги електричних диполів, що існують в неполярній фазі матеріалу. До іонних кристалів відносять титанат барію  $BaTiO_3$  з точкою Кюрі  $t_k = 120$  °C, титанат свинцю  $PbTiO_3$  ( $t_k = 490$  °C), ніобат калію  $KNbO_3$  ( $t_k = 435$  °C) та інші.

Дипольні сегнетоелектрики є з'єднаннями, в яких існують постійні електричні диполі. До них належить сегнетова сіль  $NaKC_4H_4O_6 \times 4H_2O$  ( $t_k = 24$  °C), нітрид натрію  $Na_2N$  ( $t_k = 160$  °C), тригліцинсульфат  $(NH_2CH_2COOH)_3 \times H_2SO_4$  ( $t_k = 49$  °C), що використовується для виробництва піроелектричних приймачів інфрачервоного випромінювання та інші.

На рис.2.9, 2.10 зображені петля гістерезису для сегнетоелектрика і залежність  $\varepsilon = f(t)$ . В температурній залежності діелектричної проникності сегнетової солі спостерігається дві точки Кюрі: верхня при  $t = +24$  °C і нижня при  $t = -18$  °C. Відповідно  $\varepsilon$  досягає значень 4000 і 6000,  $tg\delta$  поблизу точок Кюрі досягає максимуму і дорівнює 0,33÷0,35. За межами точок Кюрі значення  $tg\delta = 0,001$ .

На властивості сегнетової солі впливає вологість повітря. Так, при нормальній температурі і вологості повітря більше 85% сегнетова сіль починає поглинати пари води і повільно розчиняється. При вологості менше 35% проходить зворотній процес, тобто виділення кристалізаційної води.

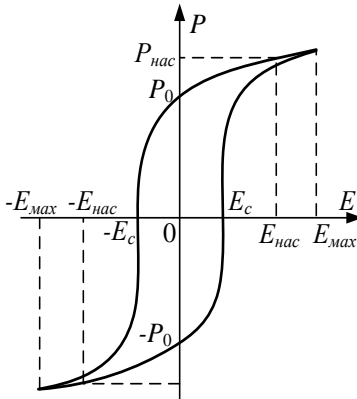


Рис.2.9. Петля гістерезису для сегнетоелектрика

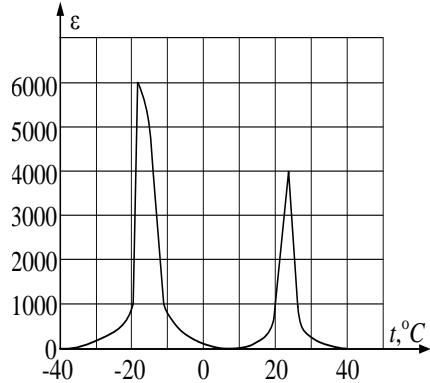


Рис.2.10. Графік залежності діелектричної проникності сегнетової солі від температури

В деяких кристалах електричні моменти сусідніх елементарних комірок орієнтовані у взаємно протилежних напрямках. Такі речовини з антипаралельними електричними моментами називаються **антисегнетоелектриками**. Вони також мають доменну структуру, однак спонтанна поляризованість кожного домена дорівнює нулю. У параелектричному стані, вище точки Кюрі, антисегнетоелектрики можуть мати високу діелектричну проникність. Прикладами є цирконат свинцю  $PbZrO_3$ , ніобат натрію  $NaNbO_3$  та інші.

**Конденсаторна сегнетокераміка** – це особлива група матеріалів, що володіють сегнетоелектричними властивостями: різкою залежністю  $\epsilon$  від температури і напруженості електричного поля, наявністю діелектричного гістерезису. Представником сегнетокераміки є титанат барію  $BaTiO_3$ . Додаванням до титанату барію деяких інших матеріалів (як сегнетоелектричних, так і несегнетоелектричних) вдається суттєво змінювати його властивості, зокрема, зміщати точку Кюрі в область більш високих температур. Матеріал складу  $7BaO \times 2SrTiO_3 \times CaTiO_3$  маркується Т-7500, позаяк значення  $\epsilon$  для нього в точці Кюрі (близько  $35^\circ C$ ) близьке до 7500.

Залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля має нелінійний характер, а отже, в конденсаторах, діелектриком в яких є титанат барію, має місце нелінійна залежність ємності від напруженості поля. Такі нелінійні конденсатори називають варикондами.

Однак конденсатори із сегнетокераміки можуть застосовуватись тільки на низьких частотах, оскільки на високих частотах спостерігаються значні діелектричні втрати.

У технічному застосуванні сегнетоелектриків намітилося кілька напрямків, найважливішими з яких слід вважати:

- виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів з високою питомою ємністю;

- використання матеріалів зі значною нелінійністю поляризації для діелектричних підсилювачів, модуляторів та інших керованих пристроїв;

- використання сегнетоелементів в обчислювальній техніці в якості запам'ятовувальних пристроїв;

- використання кристалів сегнетоелектриків для модуляції і перетворення лазерного випромінювання.

**Електрооптичні кристали** деяких сегнето- і антисегнетоелектриків мають сильновиражений електрооптичний ефект, тобто в них спостерігається зміна показника заломлення світла в середовищі, що викликається зовнішнім статичним електричним полем. Електрооптичні властивості таких кристалів використовуються для модуляції лазерного випромінювання.

Для цього модулятора ґрунтується на залежності площини поляризації світлового променя, що проходить через кристал від величини напруженості електричного поля. Для модуляторів використовують кристали ніобату літію  $LiNbO_3$ , дигідрофосфату калію  $KH_2PO_4$ .

Електрооптичний ефект може посилюватись з наближенням до точки Кюрі, що дає змогу досягти ефективної модуляції світла низькими напругами, підтримуючи при цьому температуру кристалу поблизу точки Кюрі.

**Матеріали нелінійної оптики** можна отримати при впливі потужних світлових пучків, що створюються лазерами. Тут спостерігається нелінійна поляризація середовища, тобто залежність показника заломлення від напруженості поля самої світлової хвилі. Нелінійні оптичні властивості дають змогу здійснити генерацію гармонік лазерного випромінювання й перетворення частот оптичних сигналів, перетворення інфрачервоного випромінювання лазерів у видиме світло. Це забезпечується кристалами  $KH_2PO_4$ ,  $LiNbO_3$ , йодату літію  $LiIO_3$  та ін.

## 2.5.2. П'єзоелектрики і піроелектрики

**П'єзоелектрики** – це тверді анізотропні кристалічні речовини, в яких спостерігається явище п'єзоелектричного ефекту, тобто поява електричних зарядів різних знаків на протилежних гранях кристала при механічних деформаціях (стиску, розтягу тощо). При *прямому п'єзоелектричному ефекті* величина заряду (поляризації) прямопропорційна силі (деформації або механічному напруженню  $\sigma$ ), що зображено на рис.2.11.

$$Q = d \cdot F \quad \text{або} \quad P = d \cdot \sigma, \quad (2.4)$$

де  $d$  – коефіцієнт пропорційності або п'єзомодуль, що визначає поляризованість або густину поверхневого заряду при механічному напруженні. Наприклад, для кварцу значення п'єзомодуля становить  $d = 2 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, для п'єзокераміки –  $d \approx 10^{-10}$  Кл/Н.

Для практичного застосування п'єзо ефекту на грані пластинки наносять шляхом напилення металеві електроди, які під'єднують до електричного кола. При деформації кристалу в колі виникають імпульси струму.

Виникнення механічних деформацій, коливань або зміна розмірів кристалу (відносно видовження) під впливом напруженості електричного поля  $E$  називають *зворотнім п'єзоелектричним ефектом*, характеристика якого зображена на рис.2.11. Деформація п'єзоелектрика залежить від напрямку електричного поля і змінює свій знак при цій зміні. На рис.2.12 показано деформації п'єзоелектрика при прикладеному до нього синусоїдному електричному полі.

$$\frac{\Delta l}{l} = d \cdot E. \quad (2.5)$$

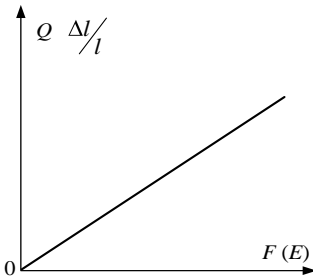


Рис.2.11. Залежність заряду (відносного видовження) від сили (напруженості електричного поля)

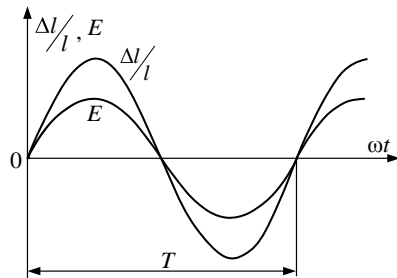


Рис.2.12. Деформації діелектрика при синусоїдному електричному полі

В теорії термодинаміки доведено, що п'езомодулі прямого і зворотнього п'езоефектів для одного і того ж матеріалу однакові.

Амплітуда механічних коливань буде змінюватись з частотою поля. При співпадінні частоти поля з власною резонансною частотою п'езоелектрика амплітуда набуває максимального значення. Такі налаштовані на резонанс п'езоелектричні пластинки використовують для збудження ультразвукових хвиль, для стабілізації частоти генераторів електричних коливань у радіотехніці.

Розрізняють п'езоелектрики монокристалічні і п'езокерамічні. Монокристалічними є природні і штучно вирощені кристали, наприклад, кварц та сегнетова сіль. П'езокераміка – це поляризований в постійному електричному полі при температурі  $t = 100 \div 150$  °С сегнетоелектрик, що є полікристалічною структурою. Тому п'езоефект у неї проявляється слабше, ніж в монокристалі, проте є можливість проектувати матеріали будь-якої форми.

П'езоефект спостерігається тільки в іонних сильнополярних діелектриках. Сюди відносять кераміку на основі твердих розчинів цирконат-титанату свинцю  $PbZrO_3-PbTiO_3$ . Ця кераміка широко використовується для створення потужних ультразвукових випромінювачів у широкому діапазоні частот для гідроакустики, дефектоскопії, механічної обробки матеріалів, а також для виробництва малогабаритних мікрофонів, телефонів, гучномовців, датчиків тиску, деформацій вібрацій. Зворотнє перетворення електричної енергії в механічну і навпаки лежить в основі роботи п'езорезонансних фільтрів, п'езотрансформаторів тощо.

**Піроелектрики** – це теплоелектричні або електротеплові перетворювачі. У поляризованих діелектриках теплова енергія може безпосередньо перетворюватися в електричну енергію за рахунок піроелектричного ефекту, тобто за рахунок зміни власної поляризації діелектриків при їхньому нагріванні або охолодженні. Таке перетворення енергії у матеріалі можливе тільки в тому випадку, якщо діелектрик (кристал, полікристал або полімер) поляризований.

Піроелектрична поляризація проявляється під час зміни температури полярної речовини. Підвищення або зниження температури полярного діелектрика змінює інтенсивність теплового руху частинок у ньому і тому змінює як орієнтацію полярних молекул, так і відстань між ними, приводячи до зміни поляризованості. Унаслідок цього на поверхні полярного діелектрика з'являються некомпенсовані електричні заряди. Якщо піроелектричний еле-

мент підключити до вхідного опору підсилювача, то через цей опір протікатиме піроелектричний струм. У випадку розімкнутого кристалу на ньому з'являється піроелектрична напруга. Однак згодом, якщо температура піроелектрика надалі не змінюється, піроелектричний струм (або піроелектричний потенціал) поступово зменшується до нуля.

Як серед мінералів, так і серед штучно синтезованих кристалів піроелектрики зустрічаються досить рідко. До піроелектриків-мінералів належить турмалін з різними домішками, а до синтетичних піроелектриків – сульфат літію ( $LiSO_4 \times H_2O$ ), ніобат літію  $LiNbO_3$  та ін.

Піроелектрики застосовуються в електроніці в якості унікально чутливих датчиків температури (сенсорах) і в інфрачервоних детекторах теплового випромінювання. У порівнянні з напівпровідниковими сенсорами температури піроелектричні сенсори мають ряд переваг: вони працюють при кімнатних температурах (неохолоджувані термодатчики), мають широкий частотний діапазон за чутливістю. Піроелектричні матеріали економічні і не вимагають високої чистоти. Численні технічні застосування стимулювали швидкий розвиток фізики піроелектриків, а також піроелектричного матеріалознавства. На сьогодні синтезовано і досліджено десятки нових піроелектриків, причому чимало з них уже знайшли технічне застосування.

Отже, піроелектричний ефект зумовлений температурною зміною спонтанної поляризації полярних кристалів, однак подібний же ефект може бути штучно індукований у будь-яких твердих діелектриках, якщо до них прикладене ззовні електричне поле. Без зовнішнього електричного поля і за відсутності механічних впливів зміна поляризованості з температурою можлива тільки у тих кристалах, де ця поляризованість існує спонтанно. Так, у нормальних умовах при температурі 300 К спонтанна поляризованість спеціально синтезованих піроелектричних кристалів дорівнює: у ніобаті літію  $P_c = 100$  мкКл/см<sup>2</sup>, у сульфаті літію  $P_c = 6$  мкКл/см<sup>2</sup>. Спонтанна поляризованість природного кристалу турмаліну складає  $P_c = 17$  мкКл/см<sup>2</sup>. Піроелектрика, як і п'єзоелектрика, визначається особливостями симетрії кристалів. Якщо для прояву п'єзоелектричних властивостей необхідною умовою є відсутність центра симетрії у структурі кристалів, то піроелектричний ефект можливий лише в тих кристалах, що мають особливий елемент симетрії –

полярну вісь. Саме ця вісь забезпечує ацентричність полярного кристалу так, що будь-який піроелектрик повинен мати й п'єзоелектричні властивості (але не навпаки).

### 2.5.3. Електрети

*Електрети* – це діелектрики, що довготривало створюють у просторі електростатичне поле за рахунок попередньої електризації або поляризації. В залежності від способу формування заряду розрізняють термоелектрети, фотоелектрети, радіоелектрети, електроелектрети. З часом величина заряду електретів змінюється внаслідок послаблення поляризації.

Термоелектрети отримують охолодженням розплавленого або нагрітого діелектрика в сильному електричному полі. Після охолодження діелектрика в електричному полі рухливість полярних молекул чи вільних зарядів різко зменшується, і діелектрик може тривалий час зберігати залишкову поляризацію та заряди.

Фотоелектрети отримують з матеріалів, що володіють фотопровідністю (сірка, сульфід кадмію, сульфід цинку тощо) при дії на них електричної та світлової енергії. Світло збільшує фотопровідність, а носії зарядів зміщуються зовнішнім електричним полем. Фотоелектрети при умові їх зберігання в темноті здатні зберігати заряди протягом декількох місяців.

*Радіоелектрети* отримують дією на діелектрик радіоактивного випромінювання. В результаті ударної іонізації поверхневих шарів прискорених заряджених частинок поверхня діелектрика виявляється зарядженою.

*Електроелектрети* отримують при дії на діелектрик тільки електричного поля. В проміжку між електродом і діелектриком вільні носії зарядів – іони та електрони бомбардують поверхню діелектрика, утворюючи таким чином заряджений поверхневий шар.

Для електретів можуть бути використані органічні діелектрики, отримані із природніх смол (каніфоль, бурштин, ебоніт, слюда), а також слабополярні і нейтральні (поліпропілен, фторопласт-4) та неорганічні речовини (кераміка, кварц).

Електрети використовуються для виготовлення електростатичних вольтметрів, мікрофонів і телефонів, вимірювання вібрацій, в якості дозиметрів радіації, вимірювачів атмосферного тиску і вологості та в інших випадках.

## 2.6. Рідкі кристали

Рідкі кристали – широкий клас органічних з'єднань, які при певних умовах мають одночасно властивості рідини (в'язкість, текучість тощо) і кристалу (анізотропія основних фізичних властивостей). Такий стан створюється речовинами з молекулами видовженої форми лише в певному діапазоні температур між точкою кристалізації і точкою перетворення в ізотропну рідину. Зі зниженням температури рідкий кристал переходить в твердий стан, а з підвищенням перетворюється в ізотропну рідину.

Сильна залежність властивостей рідких кристалів від зовнішніх факторів (температури, електричного поля, тиску) використовується при розробці індикаторних систем.

При зміні температури змінюється відстань між молекулярними шарами рідкого кристалу, відповідно змінюється довжина хвилі  $\lambda$  максимального розсіювання при заданому куті спостереження. Таким чином, можна отримати колірний термометр, який використовують в термохромному ефекті, тобто вимірюють температуру за зміною кольору рідкого кристалу, що контактує з різними поверхнями. Така термографія може використовуватись для неруйнівних методів контролю. Колірні термоіндикатори дають змогу просто відтворювати картину теплового поля у вигляді кольорових діаграм й візуалізувати інфрачервоне випромінювання.

За електричними властивостями переважна більшість рідких кристалів є полярними діелектриками з невисоким питомим опором  $\rho = 10^6 \div 10^{10}$  Ом·м. Для створення кольорових зображень у рідкі кристали вводять молекули барвників, спектр поглинання яких є функцією їхньої орієнтації щодо напрямку поляризації падаючого світла. Зовнішнє поле змінює положення молекул і відповідно спектр поглинання лінійнополяризованого світла, а заодно й колірний контраст електрооптичних комірок.

Індикаторні пристрої на рідких кристалах – це різного роду дисплеї, табло, циферблати цифрових вимірювальних приладів та ін. Основними перевагами таких індикаторів є: висока контрастність при освітленні, низька споживана потужність ( $\approx 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>), сумісність з мікросхемами, забезпечуючи тим самим мінітюаризацію приладів для запису і зберігання інформації, простота виготовлення. Недоліками таких кристалів є низька швидкодія, а також схильність, як і всіх органічних діелектриків, до процесів електрохімічного старіння.



## 2.7. Матеріали для лазерів

*Лазерами* називають джерела оптичного когерентного випромінювання, що характеризуються високою густиною енергії. Принцип роботи лазерів полягає у явищі вимушеного випромінювання. Воно полягає в одночасному випусканні узгоджених за частотою і напрямом електромагнітних хвиль (фотонів) великою кількістю атомів чи молекул під дією зовнішнього електромагнітного поля.

Основними елементами лазерів на твердих діелектриках є активне середовище (робоче тіло), оптичний резонатор і система оптичного накачування. Робочим тілом служить кристалічна або склоподібна матриця, в якій рівномірно розподілені активні іони (активатори люмінесценції). Всі процеси поглинання та випромінювання світла пов'язані з переходами електронів між рівнями активного іона.

З радіотехніки відомо, що необхідною умовою роботи будь-якого генератора є наявність в його схемі додатнього зворотнього зв'язку, при дії якого частина енергії коливань повинна надходити з виходу на його вхід. В лазерах додатній зворотній зв'язок забезпечується резонатором, що є системою з двох плоскопаралельних дзеркал. Одне з них напівпрозоре для можливості випромінювання з активного елемента.

В твердотілих лазерах як активні елементи використовують кристалічні діелектрики, до яких належать високотемпературні монокристали оксидів  $Al_2O_3$ ,  $ZnO$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ , монокристали фторидів  $CaF_2$ ,  $BaF_2$ ,  $MnF_2$ . З монокристалів найчастіше застосовують рубін, гранат, флюорит.

*Рубінами* називають кристали  $Al_2O_3$ , у яких частина іонів алюмінію замінена іонами хрому. Чисті монокристали оптично прозорі в діапазоні довжини хвиль  $0,17 \div 6,5$  мкм. Кристал рубіна має оптичну анізотропію, симетрія кристала ромбоєдрична. Перевагами рубіна є високі механічна міцність і теплопровідність.

*Трій-алюмінієвий гранат* (ІАГ)  $Y_3Al_5O_{12}$  легований неодимом  $Nd$ . Низька гранична енергія збудження при кімнатній температурі, висока механічна міцність і висока теплопровідність дають можливість застосувати цей матеріал у лазерах, що працюють у високочастотних режимах.

Кристали ІАГ оптично ізотропні й прозорі в спектральному діапазоні  $0,2 \div 4$  мкм.

## **Контрольні запитання**

1. Які основні електричні властивості діелектриків?
2. Перелічіть основні вимоги до рідких діелектриків.
3. Назвіть переваги і недоліки мінеральних олив та їх застосування у електроізоляційній техніці.
4. Охарактеризуйте основні відмінності властивостей синтетичних рідких діелектриків від мінеральних.
5. Дайте оцінку застосування газів у електроізоляційній техніці.
6. Як класифікують діелектрики за властивостями і призначенням?
7. Чим відрізняються властивості термопластичних і термореактивних полімерів?
8. Які діелектрики відносять до органічних?
9. Чим відрізняються властивості лінійних і просторових полімерів?
10. Які полімери використовують у пристроях високих частот і чому?
11. Яке призначення виробів з композиційних пластмас?
12. Чим відрізняються один від одного лаки, компаунди та емалі?
13. Які види стеклок знайшли широке застосування в електронній техніці і для яких цілей?
14. У чому подібність і різниця властивостей скла і ситалів?
15. Назвіть області застосування керамічних діелектриків.
16. У чому полягає різниця між активними і пасивними діелектриками?
17. Поясніть явище діелектричного гістерезису в сегнетоелектриках. Що називають сегнетоелектричною точкою Кюрі?
18. Що таке прямий і зворотній п'єзоефект? У яких діелектриках спостерігається це явище?
19. Поясніть явища піроелектричного та електретного ефектів.
20. Для яких цілей використовують рідкі кристали в електронній техніці?

## РОЗДІЛ 3. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

### 3.1. Електропровідність та теплопровідність металів

Провідниковими називаються матеріали, які володіють високою питомою провідністю завдяки наявності в них великої кількості вільних носіїв заряду.

В якості провідників електричного струму можуть бути використані як тверді тіла, так і рідини, а при відповідних умовах – гази. Важливими твердими провідниковими матеріалами, що застосовуються в електротехніці, є метали і їх сплави.

Класифікацію провідникових матеріалів за їхньою питомою провідністю можна представити у наступному вигляді:

1. Надпровідники;
2. Кріопровідники;
3. Метали;
4. Сплави металів;
5. Електроліти;
6. Напівпровідники.

Відмінність між окремими матеріалами полягає не тільки в значеннях їхньої питомої провідності, але й у механізмі електропровідності. Для багатьох матеріалів характерна електронна електропровідність. Такі матеріали називаються провідниками першого роду. В електролітах та деяких інших провідниках проявляється іонна та молекулярна електропровідність. Вони називаються провідниками другого роду.

За характером застосування в радіоелектронних пристроях провідникові матеріали розділяють на метали високої провідності, що мають питомий опір за нормальної температури  $\rho < 0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  та сплави високого опору, в яких  $\rho > 0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ .

Метали високої провідності використовуються для виробництва проводів, струмоведучих жил кабелів, обмоток електричних машин, мікропроводів, провідних покриттів і плівок, у надвисокочастотних хвилеводах малого загасання, для виготовлення електромагнітних екранів тощо. Сюди належать срібло, мідь, алюміній та ін.

Метали і сплави високого опору застосовуються для виготовлення резисторів, електричних нагрівальних приладів, термопар і т.п. До них належать мідно-марганцеві сплави (манганіни), мідно-нікелеві сплави (константани), сплави заліза, нікелю і хрому (ніхроми, фероніхроми) та ін.

До рідких провідників належать розплавлені метали й електроліти. При нормальній температурі як рідкий провідник може використовуватися тільки ртуть, що має температуру плавлення  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$  або гелій ( $-29,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Інші метали можуть бути рідкими провідниками тільки за підвищених або високих температур.

Електролітами є розчини кислот, лугів і солей, а також розплави іонних з'єднань. Електропровідність електролітів пов'язана з переносом іонів, у результаті чого склад електроліту поступово змінюється, а на електродах виділяються продукти електролізу.

Рідкі провідникові матеріали використовуються в різноманітних давачах, гальванічних елементах, акумуляторах, у хімічному виробництві.

Всі гази й пари при низьких напруженостях електричного поля не є провідниками. Однак, коли напруженість електричного поля перевищує деяке критичне значення, що відповідає появі ударної і фотонної іонізації, газ стає провідником з електронною та іонною електропровідністю. Особливе провідне середовище представляє сильно іонізований газ із однаковою кількістю електронів і позитивно заряджених іонів в одиниці об'єму, що називається плазмою. Плазма є хорошим провідником електричного струму і має діамагнітні властивості. Зокрема, ізотермічна плазма використовується як провідник в магнітогазодинамічних генераторах (МГД-генератори), які призначені для безпосереднього перетворення теплової енергії в електричну.

Особливий інтерес викликають метали, що володіють надзвичайно малим за досить низьких (криогенних) температур опором – надпровідники і кріопровідники, до яких відносять алюміній, свинець, ртуть, олово, індій та ін.

Механізм проходження струму в металах – як у твердому, так і в рідкому стані – зумовлений рухом (дрейфом) вільних електронів під дією електричного поля.

Проходження струму через електроліти пов'язане з переносом разом з електричними зарядами іонів згідно із законами Фарадея, внаслідок чого склад електроліту поступово змінюється, а на електродах виділяються продукти електролізу. Іонні кристали в розплавленому стані також є провідниками другого роду.

**Електропровідність металів.** Класична електронна теорія металів представляє собою твердий провідник у вигляді системи, що складається з вузлів кристалічної ґратки (іонної), всередині якої

знаходиться електронний газ із колективізованих електронів. У вільному стані від кожного атома металу переходить від одного до двох електронів. До електронного газу застосовуються уявлення і закони статистики звичайних газів. При вивченні хаотичного (теплого) і напрямленого під дією сили електричного поля руху електронів був виведений закон Ома.

У металах і сплавах здебільшого є велика кількість вільних електронів. Ці електрони й атоми решітки роблять хаотичні рухи, швидкість яких тим більша, чим вища температура металу.

Таким чином, електронна теорія металів дає можливість аналітично описати і пояснити основні закони електропровідності і втрат електричної енергії в металах, що підтверджено експериментальними результатами, а саме:

1. Спостерігається прямий зв'язок між електропровідністю та теплопровідністю;

2. При тривалому протіканні електричного струму через коло, що складається з металевих провідників, не спостерігається проникнення атомів одного металу в інший;

3. При нагріванні металів до високих температур спостерігається емісія вільних електронів з поверхні;

4. Поява електрорушійної сили ЕРС на кінцях провідника, що швидко рухався і різко зупинився за рахунок інерції в напрямі руху;

5. Зміна питомого опору в металевій пластинці, поміщеній в поперечне магнітне поле через викривлення траєкторії електронів.

Уявляючи метал, як систему, де позитивні іони спричинюються з допомогою вільно рухаючих електронів, легко зрозуміти природу основних властивостей металів: пластичності, високої теплопровідності і електропровідності.

Основними, що визначають властивості провідників, є електричні, фізичні і механічні параметри:

- 1) питомий електричний опір  $\rho$  або питома провідність  $\gamma$ ;
- 2) температурний коефіцієнт питомого опору  $TK_p$  ( $\alpha_p$ );
- 3) контактна різниця потенціалів і термоелектрорушійна сила (термоЕРС);
- 4) робота виходу електронів з металу;
- 5) коефіцієнт теплопровідності  $\gamma_T$ ;
- 6) температурний коефіцієнт лінійного розширення  $TK_l$  ( $\alpha_l$ ) та температура плавлення  $t_{пл}$ ;

7) межа міцності на розтяг  $\sigma_p$  і відносне видовження перед розривом  $\Delta l/l$ .

Зв'язок густини струму  $J$ , А/м<sup>2</sup> і напруженості електричного поля  $E$ , В/м у провіднику визначається на основі диференціальної форми запису закону Ома:

$$J = \gamma \cdot E, \quad (3.1)$$

де  $\gamma$  – питома електропровідність См/м;  $E$  – напруженість електричного поля, В/м.

Відповідно до закону Ома провідність  $\gamma$  не залежить від напруженості електричного поля  $E$  при її зміні в досить широких межах. Величина  $\rho = 1/\gamma$  називається питомим опором провідника, що має опір  $R$ , довжину  $l$ , переріз  $S$  і обчислюється за формулою:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l}. \quad (3.2)$$

Діапазон значень питомих опорів металевих провідників становить: від  $0,016 \cdot 10^{-6}$  Ом·м для срібла і приблизно до  $1,5 \cdot 10^{-6}$  Ом·м для залізо-хромоалюмінієвих сплавів. Чисті метали з правильними кристалічними ґратками характеризуються найменшими значеннями питомого опору. Домішки інших металів або неметалічні домішки, спотворюючи кристалічні ґратки, зумовлюють збільшення питомого опору, оскільки на дефектах кристалічних ґраток відбувається розсіювання електронних хвиль через зменшення рухливості електронів. Зростання питомого опору спостерігається і при сплавленні двох металів, якщо вони утворюють твердий суцільний сплав.

При русі електронного газу під дією електричного поля проходить зіткнення електронів з іонами кристалічної ґратки. При цьому енергія електронів передається іонам металу і провідник нагрівається. Потужність питомих теплових втрат в провіднику  $\Delta p$  [Вт/м<sup>3</sup>] визначається, користуючись законом Джоуля-Ленца:

$$\Delta p = J \cdot E = \gamma \cdot E^2 = \frac{E^2}{\rho}. \quad (3.3)$$

Питома електропровідність металічних провідників згідно з класичною теорією металів може бути визначена за такою формулою [3, 8]

$$\gamma = \frac{e^2 \cdot n \cdot l_{cp}}{2mv_T} = ne\mu, \quad (3.4)$$

де  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона,  $n$  – концентрація електронів у провіднику,  $m^{-3}$ ,  $l_{cp}$  – середня довжина вільного пробігу електронів, м,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – маса електрона,  $v_T$  – середня швидкість теплового руху вільних електронів у металі, м/с,  $\mu$  – рухливість електронів, зумовлена дією електричного поля з напруженістю  $E$ ,  $m^2/(В \cdot с)$ .

Значення швидкості  $v_T$  в різних провідниках приблизно однакові. Також майже не відрізняються між собою і концентрації вільних електронів  $n$ . Наприклад, в нормальних умовах для міді  $n = 8,5 \cdot 10^{28} m^{-3}$ , для алюмінію  $n = 8,3 \cdot 10^{28} m^{-3}$ . Найбільше відрізняються між собою значення  $\mu$  і  $l_{cp}$ , що залежать від структури провідника і визначають його опір електричному струму. Будь-які домішки чи дефекти кристалічної ґратки призводять до зниження значень  $\mu$  і  $l_{cp}$  та до зменшення питомої електропровідності провідника.

Важливе значення має характер залежності питомого опору металів від температури. Вважаючи, що кінетична енергія теплового руху вільних електронів підпорядковується тим же закономірностям, що й теплова енергія молекул ідеального газу, запишемо [5]:

$$\frac{1}{2} m v_T^2 = \frac{3}{2} kT, \quad (3.5)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана,  $T$  – термодинамічна температура, К.

Визначимо  $v_T$  з (3.5) і, підставивши в (3.4), матимемо аналітичну залежність питомої електропровідності та питомого опору  $\rho$  від температури  $T$

$$\gamma = \frac{ne^2 l_{cp}}{2\sqrt{3mkT}}; \quad \rho = \frac{2\sqrt{3mkT}}{ne^2 l_{cp}}. \quad (3.6)$$

З отриманих формул можна зробити висновок, що при підвищенні температури питомий опір металу зростає. Пояснюється це також і тим, як було сказано вище, що при підвищенні температури посилюються коливання вузлів кристалічних ґраток, зменшуються довжина вільного пробігу електронів та їх рухливість і, як наслідок, зростає опір.

**Температурний коефіцієнт питомого опору**  $TK_\rho$  ( $\alpha_\rho$ ) провідників ( $K^{-1}$ ) є додатним і обчислюється за формулою:

$$TK_{\rho} = \alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_t - \rho_0}{T - T_0}, \quad (3.7)$$

де  $\rho_0$  – питомий опір при початковій температурі  $T_0$ ,  $\rho_t$  – питомий опір при кінцевій температурі  $T$  (нагрітий стан).

З цієї формули обчислюємо  $\rho_t$  для температури  $T$ .

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha_{\rho}(T - T_0)]. \quad (3.8)$$

Відповідно до класичної електронної теорії Друде-Лоренца [5, 15], значення температурного коефіцієнта питомого опору чистих металів у твердому стані повинне бути близьким до температурного коефіцієнта розширення ідеального газу, тобто  $1/273 \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$ . Виняток мають феромагнітні матеріали (залізо, нікель, кобальт, хром), де  $\alpha_{\rho} = (0,006 \div 0,0065) \text{ K}^{-1}$ .

Залежність питомого опору від температури для деяких провідників показано на рис.3.1. Під час плавлення у більшості металів спостерігається різке збільшення питомого опору (рис.3.2).

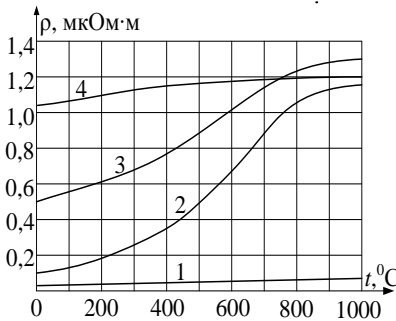


Рис.3.1. Залежність  $\rho = f(T)$  металів і сплавів від температури: 1 – мідь, 2 – залізо, 3 – сталь, 4 – ніхром

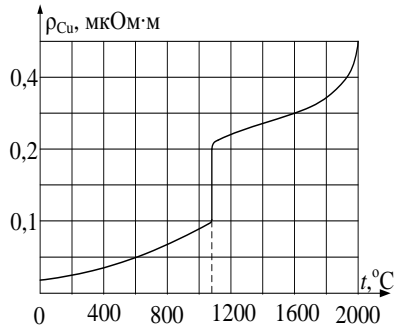


Рис.3.2. Графік залежності  $\rho = f(T)$  для міді

Однак існують метали, в яких питомий опір під час плавлення зменшується. Збільшення питомого опору спостерігається в тих металів, у яких при плавленні збільшується об'єм, тобто зменшується густина. У металів, що зменшують свій об'єм при плавленні, питомий опір  $\rho$  зменшується. Прикладом таких металів є: вісмут (опір зменшується на 54 %); галій – на 53 %; сурма – на 30%.

Домішки до чистих металів, а також порушення їхньої структури, як правило, призводять до збільшення питомого опору.



Якщо під час сплавлення двох металів відбувається утворення твердого розчину, тобто при затвердінні вони спільно кристалізуються і атоми одного металу входять у кристалічні ґратки другого, то відбувається істотне збільшення питомого опору.

**Зміна питомого електроопору металів при деформаціях.** Зміна питомого опору при пружному розтягуванні або стисненні приблизно може оцінюватися формулою [15]

$$\rho_{\sigma} = \rho_0 (1 \pm s \cdot \sigma), \quad (3.9)$$

де  $\rho_{\sigma}$  – питомий опір металу при механічному напруженні  $\sigma$ ;  $\rho_0$  – питомий опір металу;  $s$  – коефіцієнт механічного напруження, що характеризує даний метал, знак «+» відповідає розтягуванню, знак «-» відповідає стисненню. Значення  $s$  в більшості випадків лежать у межах  $s = \pm (1 \div 5) \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ .

Зміна  $\rho$  при пружних деформаціях пояснюється зміною амплітуди коливань вузлів кристалічної ґратки металу. При розтягуванні ці амплітуди збільшуються, при стисненні – зменшуються. Збільшення амплітуди коливань вузлів призводить до зменшення рухливості носіїв зарядів і до зростання  $\rho$  та навпаки.

Пластична деформація, як правило, підвищує питомий опір металів унаслідок спотворення кристалічної ґратки. При рекристалізації шляхом термічної обробки (відпалювання) питомий опір може знову зменшитись до попереднього значення.

**Термоелектрорушійна сила.** При контакті двох різних металічних провідників між ними виникає контактна різниця потенціалів.

**Термопара** – це пристрій для вимірювання температури, який складається із двох різнойменних, ізольованих один від одного електродів, зварених між собою. Точка зварювання називається робочим спаєм. Коли робочий спай помістити в середовище, що має підвищену температуру, то на кінцях термоелектродів виникає так звана термоелектрична рушійна сила (ТЕРС). Величина цієї ТЕРС залежить від температури середовища.

Кожна пара електродів (матеріал електродів) генерує свою величину ТЕРС. В техніці прийнято кожен матеріал перевіряти на здатність давати ТЕРС в парі з мідним електродом. Величина цієї ТЕРС на  $1 \text{ }^{\circ}\text{К}$  зафіксована в довідниках [2, 12].

Виникнення термоелектрорушійної сили на контакті двох металів пояснює класична теорія електропровідності. Поява термоЕРС зумовлена відмінністю концентрацій вільних електронів ( $n_a$ ,

$n_b$ ) в металах  $A$  і  $B$ , що призводить за законами дифузії до переходу частини електронів у метал з меншою їх концентрацією, а також у тому, що тиск електронного газу і концентрація електронів у різних металах можуть бути неоднаковими. Однак, щоб залишити межі металу, електрон повинен мати визначену енергію, що називається роботою виходу електрону  $W_{BE}$ . Ця величина характерна для кожного провідника і визначає в деякій мірі емісійні властивості металу, тобто його здатність бути джерелом електронів. Величина контактної різниці потенціалів для різноманітних пар коливається в межах від десятих долей вольта до декількох вольт. Якщо в замкненому колі провідників один контакт нагріти до температури  $t_1$ , а інший – до температури  $t_2$ , то в колі виникає термоЕРС, що вимірюється у вольтах:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (3.10)$$

де  $U_A$  і  $U_B$  – потенціали контактних металів;  $n_{0A}$  і  $n_{0B}$  – концентрація електронів у металах  $A$  і  $B$ ;  $k$  – постійна Больцмана;  $e$  – абсолютна величина заряду електрона.

Якщо температури „спаїв” однакові, то сума різниці потенціалів у замкнутому колі рівна нулю. Інша справа, коли один із спаїв має температуру  $T_1$ , а інший – температуру  $T_2$ . В цьому випадку між спаями виникає термоЕРС, що дорівнює

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{k \cdot T_1}{e} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} + U_A - U_B + \frac{k \cdot T_2}{e} \cdot \ln \frac{n_{0B}}{n_{0A}} = \frac{k}{e} \cdot (T_2 - T_1) \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}. \quad (3.11)$$

Величину  $\frac{k}{e} \cdot \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}$  позначимо через коефіцієнт  $\psi$ . Тоді формула (3.11) набуде наступного вигляду:

$$U = \psi(T_1 - T_2), \quad (3.12)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт термоЕРС [В/К], постійний для даної пари провідників. Тобто, термоЕРС пропорційна різниці температур спаїв. Значення  $\psi$  для деяких пар металів становить 10÷50 мкВ/К.

Фактично співвідношення (3.12) дотримується не завжди і залежність термоЕРС від різниці температур може бути не строго лінійною. Коефіцієнт термоЕРС провідників для термопар підбирають якомога більшим за величиною, постійним в широкому тем-

пературному діапазоні і стабільним у часі. Досить високими коефіцієнтами термоЕРС володіють деякі напівпровідникові матеріали.

Навпаки, у пристроях з малими і дуже малими струмами і напругами, в еталонних та вимірювальних пристроях наявність термоЕРС небажана, бо вона вносить похибки під час вимірювань. Для її зменшення застосовують провідникові матеріали або сплави з мінімальним коефіцієнтом термоЕРС відносно мідних провідників (наприклад, срібло, золото, кадмій, цинк та інші).

Для виготовлення термопар використовують такі матеріали:

1) вольфрам-реній – для вимірювання температур до 2000 °С. Містить від 80 до 95% вольфраму (*W*) і від 5 до 20% ренію (*Re*). Для нормальної роботи цієї термопари необхідний захист електродів аргонном;

2) платинородій-платина: до 1600 °С. Платинородій містить 90% платини (*Pt*) 10% родію (*Ro*).

3) хромель-алюмель: 1000 °С. Складається хромель із 90% нікелю (*Ni*) і 10% хрому (*Cr*). Алюмель містить 95% нікелю (*Ni*), решта – алюміній (*Al*), кремній (*Si*), марганець (*Mn*);

4) хромель-копель: до 600 °С. Копель містить 44% нікелю і 56% міді.

Найбільшу термоЕРС за даної різниці температур розвиває термопара хромель-копель, найменшу – платинородій-платина.

Схему термопари та залежність термоелектричної рушійної сили від різниці температур спаїв деяких термопар зображено на рис.3.3, рис.3.4. На рис.3.4. номери відповідають таким термопарам: 1 – мідь-константан; 2 – платинородій-платина; 3 – хромель-алюмель; 4 – хромель-копель; 5 – залізо-копель.

Для захисту термоелектродів із сторони середовища, де потрібно вимірювати температуру, використовується захисна арматура. По-перше, це захист від механічних пошкоджень з боку технологічного середовища. По-друге, це захист від агресивного середовища. Для вольфрам-ренійової термопари вольфрамовий електрод за високої температури інтенсивно руйнується киснем, що знаходиться в атмосфері повітря, тому конструкція термопари передбачає подачу в спеціальний канал термопари захисного газу аргону, який оточує термоелектроди і створює захисну атмосферу. Захист від пошкоджень здійснюється спеціальними захисними чохлами.

Для платино-платинородієвих термопар необхідний захист тільки від механічних пошкоджень, який здійснюється за допо-

могою захисних чохлаів із фарфору, ультрафарфору. Для термопар хромель-алюмелевих використовуються захисні чохлаи із сталі марки Х25Т, для хромель-копелевих із сталі Х18Н9Т.

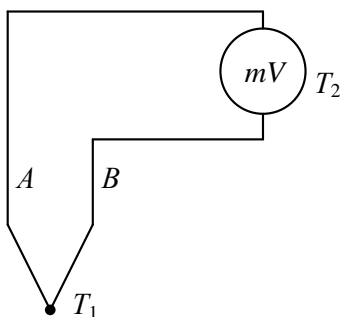


Рис.3.3. Схема термопары

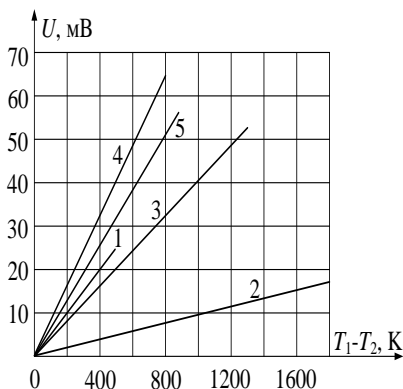


Рис.3.4. Залежність  $U = f(T_1 - T_2)$

**Теплопровідність металів.** Висока теплопровідність металів легко пояснюється передачею теплової енергії атомів нагрітої ділянки металу атомам холодної ділянки за рахунок переносу цієї енергії колективізованими електронами.

Таким чином, теплопровідні пристрої, наприклад, напівпровідникових приладів, а також шасі приладів чи радіатори виготовляють з цих металів.

Коефіцієнт теплопровідності металів  $\gamma_T$  значно вищий, ніж у діелектриків, що зумовлено більшою кількістю вільних електронів в одиниці об'єму. За інших рівних умов, чим більша питома електропровідність металу, тим більшим повинен бути коефіцієнт теплопровідності.

Коефіцієнт теплопровідності провідників  $\gamma_T$  прямопропорційний їх питомій провідності. Тому найвищими значеннями  $\gamma_T$  володіють метали з максимальною провідністю: срібло, мідь, алюміній.

Залежність питомої провідності від коефіцієнта теплопровідності показує закон Відемана-Франца-Лоренца [3, 5]:

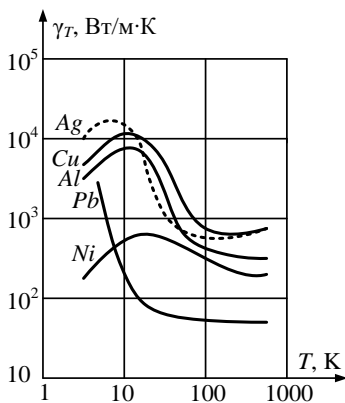


Рис.3.5. Залежність  $\gamma_T = f(T)$

$$\frac{\gamma_T}{\gamma} = L_0 \cdot T, \quad (3.13)$$

де  $T$  – термодинамічна температура,  $K$ ,  $L_0$  – число Лоренца

$$L_0 = \frac{\pi^2 k^2}{3e^2} \frac{3,14^2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}}{3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,45 \cdot 10^{-8} \frac{B^2}{K^2}. \quad (3.14)$$

Для більшості металів (крім марганцю і берилію) цей закон справедливий при нормальних або дещо підвищених температурах.

Перевіримо справедливість цього закону для міді за нормальної температури. Підставляючи в формулу (3.13) параметри міді  $\gamma = 58 \cdot 10^6 \text{ См/м}$  і  $\gamma_T = 390 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  і температуру  $T = 293 \text{ К}$  отримуємо  $L_0 = 2,47 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$ , що приблизно дорівнює теоретичному значенню.

Механічні властивості провідників характеризуються границею міцності при розтягу  $\sigma_p$  та відносним видовженням перед розривом  $\Delta l/l$  і в значній мірі залежать від ступені їх обробки та наявності легованих домішок.

**Температурний коефіцієнт лінійного розширення** дає змогу визначити зміну будь-яких геометричних розмірів матеріалів при нагріванні і визначається подібно до температурного коефіцієнта питомого опору за формулою:

$$TK_l = \alpha_l = \frac{1}{l_0} \frac{l_1 - l_0}{T_1 - T_0}. \quad (3.15)$$

Він служить для аналізу роботи матеріалу, що складається з різних компонентів, оскільки в ньому можуть виникати розтріскування. Цей коефіцієнт необхідно враховувати не тільки під час розгляду роботи різних композитних матеріалів у тій чи іншій конструкції, тому що можливе її механічне руйнування при зміні температури (розтріскування скла, кераміки), але й при розрахунку температурного коефіцієнта електричного опору

$$TK_R = \alpha_R = \alpha_p - \alpha_l. \quad (3.16)$$

Для чистих металів, як правило,  $\alpha_l \ll \alpha_p$ , тому значенням  $\alpha_l$  можна знехтувати й вважати  $\alpha_R \approx \alpha_p$ . Але для сплавів значенням  $\alpha_l$  нехтувати не можна. При підвищенні температури значення  $\alpha_l$  в металів, зазвичай, зростає. При нормальних температурах легкоплавкі метали володіють великими значеннями  $\alpha_l$ , а тугоплавкі – малими  $\alpha_l$ .

Розглянемо, як можуть змінюватися геометричні розміри провідникового матеріалу при зміні температури на наступному прикладі. Необхідно визначити температурний коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha_l$  і видовження ніхромового проводу, якщо відомо, що при підвищенні температури від 20 до 1000 °С електричний опір дроту змінюється від 50 до 56,6 Ом. Довжина проводу в холодному стані  $l = 50$  м. Температурний коефіцієнт питомого опору ніхрому  $\alpha_p = 15 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

Температурний коефіцієнт опору ніхромового проводу знаходимо за формулою

$$\alpha_R = \frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{56,6 - 50}{50 \cdot (1000 - 20)} = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

Тоді

$$\alpha_l = \alpha_p - \alpha_R = (15 - 13,5) \cdot 10^{-5} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Звідси

$$\Delta l = l \cdot \alpha_l \cdot \Delta T = 50 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 980 = 0,735 \text{ м}.$$

**Опір провідників на високих частотах.** На високих частотах спостерігається нерівномірний розподіл електричного струму по перерізу провідників: густина струму максимальна на поверхні і зменшується по мірі проникнення вглиб провідника. Це явище отримало назву поверхового ефекту (скін-ефекту).

Нерівномірний розподіл струму пояснюється дією магнітного поля того ж провідника. Зчеплений з проводом магнітний потік  $\Phi$  пропорційний струму

$$\Phi = Li, \quad (3.17)$$

де  $L$  – індуктивність провідника;  $i$  – струм, що протікає через провідник. Зміну магнітного потоку викликає поява ЕРС самоіндукції

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (3.18)$$

Якщо струм змінюється за синусоїдним законом, то індукована ЕРС пропорційна частоті:

$$i = I_m \sin \omega t; \quad e_L = -L \frac{d I_m \sin \omega t}{dt} = -L \omega I_m \cos \omega t. \quad (3.19)$$

ЕРС самоіндукції має напрям, протилежний струму в проводі і сповільнює його зміну відповідно до закону Ленца. При проходженні змінного струму змінне магнітне поле виникає як поза проводом, так і всередині нього, причому по відношенню до цього поля різні ділянки перерізу проводу знаходяться не в однакових умовах. Дійсно, поточкозчеплення буде максимальним для внутрішньої центральної жили і мінімальним для поверхневих шарів провідника. Тому ЕРС самоіндукції максимальна в центрі провідника і затухає в напрямку до поверхні.

Відповідно і густина струму найбільш сильно послаблюється в центральних частинах провідника і в меншій мірі на поверхні.

З ростом частоти витіснення струму до поверхні провідника проявляється сильніше, так як ЕРС самоіндукції пропорційна частоті.

Прийнявши на рис.3.6 вісь  $X$  для провідникового напівпростору за напрямок струму, нормаль до поверхні – за вісь  $Z$  і вважаючи, що розподіл залишається незмінним уздовж осі  $X$ , одержимо наступне рівняння розподілу густини струму по перерізу провідника [14]

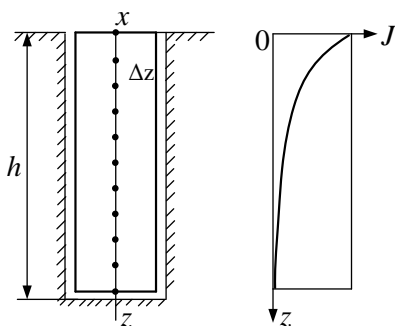


Рис.3.6. Переріз провідника та розподіл густини струму в ньому

$$J_x z = J_0 \cdot e^{-\frac{z}{h}}, \quad (3.20)$$

де  $J_0$  – густина струму на поверхні;  $h$  – глибина проникнення поля.

Напруженість електричного поля змінюється за тим же законом, що і густина струму, оскільки  $J = \gamma \cdot E$ . Глибина проникнення поля чисельно дорівнює відстані, на якій амплітуда напруженості поля, а, отже і густина струму, зменшується в  $e = 2,7$  раза по відношенню до свого значення на поверхні провідника. У міру віддалення від поверхні змінюється не тільки амплітуда поля, а й фаза електромагнітних коливань на  $z/\Delta z$ , тобто всередині провідного середовища коливання запізнюються по фазі по відношенню до коливань на поверхні.

Поверхневий ефект посилюється не тільки при збільшенні частоти  $f$ , а й при збільшенні магнітної проникності  $\mu$  і питомої провідності  $\gamma$  матеріалу. Це пояснюється тим, що збільшення  $\mu$  викликає збільшення потоку всередині провідника, тобто до збільшення індуктивності провідника  $L$ , а збільшення  $\gamma$  підсилює вплив ЕРС самоіндукції. Зв'язок глибини проникнення поля  $\Delta$  з фізичними характеристиками речовини визначається виразом [14]

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu\mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\gamma\mu\mu_0}}, \quad (3.21)$$

$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна постійна вакууму.

Оскільки центральна частина перерізу провідника майже не використовується, то активний опір проводу  $R_{\text{акт}}$  при проходженні по ньому змінного струму більший, ніж його активний опір  $R_{\text{пост}}$  при постійному струмі. Коефіцієнт збільшення опору  $k_R$  круглого циліндричного проводу діаметром  $d$  визначають за формулою

$$k_R = \frac{d}{4\Delta}. \quad (3.22)$$

Формула (3.22) дає високу точність при  $\Delta \ll d$ .

У радіотехніці для плоских провідників використовують спеціальну характеристику – опір квадрата поверхні  $R_s$  [Ом] з виразу

$$R_s = \frac{\rho}{\Delta}. \quad (3.23)$$

Вираз (3.23) показує, що активний опір  $R_s$  плоского провідника нескінченної товщини у випадку поверхневого ефекту дорівнює опору плоского провідника товщиною  $\Delta$  для постійного струму.

### 3.2. Матеріали високої провідності

До матеріалів цього типу висувається ряд вимог. Сюди відносять мінімальне значення питомого електричного опору, досить високі механічні властивості (межа міцності при розтягу  $\sigma_p$ , відносне видовження перед розривом  $\Delta l/l$ ), здатність легко оброблюватися, що необхідно для виготовлення проводів малих і середніх перерізів; здатність утворювати контакти з малим перехідним опором при спаюванні, зварюванні та інших методах з'єднання проводів; корозійну стійкість.



Основною вимогою є забезпечення максимальної питомої провідності матеріалу. Однак електропровідність металу може знижуватись через наявність додаткових домішок, деформації металу, що виникає при штампуванні та призводить до дефектів структури металу. Вплив деформації металу на його електропровідність припиняється при його загартуванні, при якому кількість дефектів у металі суттєво зменшується.

Найбільш поширеними сучасними матеріалами високої провідності, що застосовуються в радіоелектроніці, є кольорові метали (мідь, алюміній, цинк, олово, магній, свинець) і чорні метали (залізо), які застосовуються в чистому вигляді. Поряд з цим широко застосовуються сплави цих металів, так як вони за певних умов можуть мати інші (кращі) властивості та дешевіші порівняно з чистими металами. Отже, кольорові метали і їх сплави доцільно використовувати в тих випадках, коли необхідні властивості неможливо отримати, застосовуючи чорні метали (чугун, сталь).

Для покращення властивостей кольорові сплави також піддають термічній обробці – загартуванню.

Широке застосування *міді* як провідникового матеріалу зумовлено такими цінними властивостями цього металу:

- 1) низький питомий опір;
- 2) висока механічна міцність;
- 3) задовільна стійкість до корозії;
- 4) хороша обробка (мідь протягується в листи, стрічки);
- 5) відносна простота спаювання і зварювання.

Мідь отримують шляхом переробки мідних руд. Після декількох плавок руди з інтенсивним дуттям мідь, призначена для електрорадіотехніки, обов'язково проходить процес електролітичної очистки. Отримані після електролізу катодні пластини переплавляють і протягують у виробі потрібного поперечного перерізу.

Домішки інших металів різко понижують провідність міді. Тому для основних марок провідникової міді допускається вміст домішок не більше 0,1%. Слід відмітити, що вміст кисню суттєво погіршує механічні властивості міді.

Основні марки міді – *M1* і *M0* розрізняють за вмістом домішок. Марка *M1* містить 99,9% міді, а в загальній кількості домішок (0,1%) кисню повинно бути не більше 0,08%.

Марка *M0*, в якій є не більше 0,05% домішок, в тому числі не більше 0,02% кисню.

При холодній протяжці отримують тверду мідь (*MT*), яка має високу міцність при розтягуванні, має мале відносне видовження перед розривом, і володіє пружністю під час згину. Якщо ж мідь нагріти до декількох сот градусів, то отримується м'яка мідь (*MM*), яка пластичніша, менш тверда, але має велике видовження перед розривом, більш високу питому провідність.

М'яка мідь, питомий опір якої за 20 °С не повинен перевищувати 0,01724 мкОм·м у вигляді проводів різного перерізу й форми, як правило, застосовується для виготовлення струмопровідних жил кабелів, обмоткових і монтажних проводів, екранів силових кабелів, обмоток електричних машин і т.д., де важливі гнучкість і пластичність (не повинна пружинити під час згину), а не міцність.

Тверда (холоднокатана) мідь, питомий опір якої має бути не більше 0,018 мкОм·м, застосовується в основному там, де необхідно забезпечити високу механічну міцність, твердість, пружність і опір до стирання. Такі вимоги висуваються до міді під час виготовлення контактних проводів, шин розподільних пристроїв, колекторних пластин електричних машин і т.д.

Помітний вплив на механічні й електричні характеристики міді має температура. При нагріванні вище 200 °С у результаті процесу рекристалізації механічні й електричні характеристики міді погіршуються. Крім того, питома провідність міді істотно залежить від наявності домішок.

На рис.3.7 показано залежність відносної питомої електропровідності міді від вмісту домішок окремих металів.

Так, при вмісті в міді 0,5% домішки цинку *Zn*, кадмію *Cd* або срібла *Ag* її питома провідність знижується на 2÷5%. При тому ж вмісті нікелю *Ni* або алюмінію *Al* питома провідність міді зменшується на 25÷40%. Ще сильніший вплив чинять домішки заліза *Fe* та фосфору *P*, знижуючи питому провідність чистої міді на 55 % і більше. З іншого боку, домішки багатьох металів підвищують механічну міцність і твердість міді.

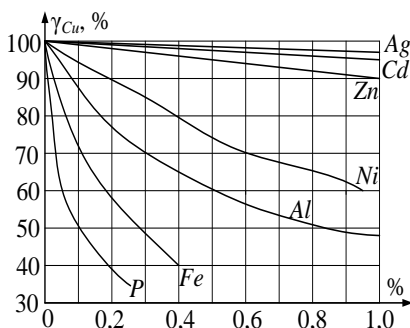


Рис.3.7. Залежність питомої провідності  $\gamma$  міді від вмісту домішок (в % по масі)

До недоліків міді варто також віднести її схильність до атмосферної корозії з утворенням окисних і сульфідних плівок. Швидкість окислювання зростає під час нагрівання, але міцність зчеплення оксидної плівки з металом невелика. Внаслідок окислювання мідь не придатна для слабострумових контактів, тому що металеве відшаровування і термічне розкладання викликає прискорене зношування мідних контактів при великих струмах.

Механічні й електричні характеристики провідникової міді визначають широкі області її застосування. Мідь є порівняно дорогим і дефіцитним матеріалом і як провідниковий матеріал може замінюватись іншими матеріалами, зокрема алюмінієм.

**Срібло** – білий, блискучий метал, стійкий проти окислення за нормальної температури. Характеризується найменшим питомим опором  $\rho = 0,016$  мкОм·м. Високі механічні властивості срібла ( $\sigma_p = 200$  МПа,  $\Delta l/l = 50$  %) дають змогу промислово виготовляти з нього провідники різного діаметру аж до мікропроводів діаметром від 20 мкм і менше. Такий провід використовують для виготовлення контактів на невеликі струми. Як провідник, срібло використовують у вигляді гальванічного покриття у відповідних високочастотних пристроях. Срібло використовують також для безпосереднього нанесення на діелектрики в якості електродів у виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів. Однак необхідно знати, що при підвищених температурах і вологості атоми срібла схильні мігрувати на поверхні та всередину діелектрика, викликаючи збої у роботі пристроїв.

До недоліків срібла слід віднести також його властивість легко утворювати плівки сірчаних з'єднань, які мають підвищений питомий опір, що робить необхідним захист срібних покриттів лаками або дуже тонкими шарами більш стійкого металу, наприклад паладію. Необхідно відмітити, що срібло відносять до гостродефіцитних дорогих металів.

**Алюміній** є другим за значенням (після міді) провідниковим матеріалом. Це легкий метал з густиною меншою  $5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Алюміній володіє пониженими в порівнянні з міддю властивостями – як механічними, так і електричними.

При однаковому перерізі і довжині електричний опір алюмінієвого проводу більший, ніж у мідного в  $0,028/0,0172 = 1,63$  рази. Звідси, щоб отримати алюмінієвий провідник такого ж електричного опору як і мідний, потрібно взяти його переріз у  $0,028/0,017 = 1,63$  рази більшим. Звідси зрозуміло: якщо конструкція електро-

технічного пристрою повинна мати обмежені габарити, то заміна міді алюмінієм затруднена. Якщо ж порівняти за масою два зразки алюмінієвого та мідного проводів однієї ж довжини і одного опору, то виявиться, що алюмінієвий провід хоч і товстіший мідного, але легший від нього приблизно в 2 рази.

В електротехнічній промисловості використовується алюміній, що містить не більше 0,5% домішок, марки А1 (АЕ). Більш чистий алюміній марки АВ00 (А97), що містить не більше 0,03% домішок, застосовують для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів, корпусів оксидних конденсаторів. Алюміній найвищої чистоти марки АВ0000 (А999) містить домішок не більше 0,001%. Домішки різних металів по-різному впливають на електропровідність алюмінію, зменшуючи її.

На рис.3.8 показано, як впливають домішки деяких металів на електропровідність алюмінію. Різко зменшують електропровідність алюмінію дуже незначні (до 0,05%) домішки титану  $Ti$ , марганцю  $Mn$  та ванадію  $V$ . Найменший вплив чинять домішки нікелю  $Ni$ , кремнію  $Si$  та заліза  $Fe$ . Домішки міді  $Cu$  та магнію  $Mg$  понижують  $\gamma$  алюмінію на 5÷10%. На рис.3.9 зображено температурні залежності теплоємності  $c$ , коефіцієнта лінійного розширення  $\alpha_l$ , питомого опору  $\rho$  для алюмінію.

Алюміній активно окислюється і покривається тонкою плівкою окису з високим електричним опором. Ця плівка захищає алюміній від корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів, що унеможливує паяння алюмінію звичайними методами. Для пайки алюмінію застосовують спеціальні пасти-припої або ультразвукові паяльники.

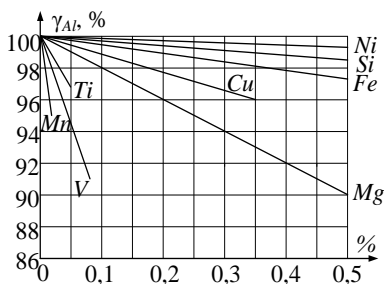


Рис.3.8. Залежність провідності  $\gamma$  міді від вмісту домішок

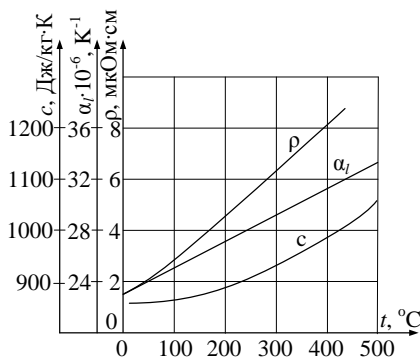


Рис.3.9. Залежності  $c = f(T)$ ,  $\alpha_l = f(T)$ ,  $\rho = f(T)$  для алюмінію

Важливе практичне значення має проблема захисту від гальванічної корозії місць контакту міді й алюмінію. Коли область контакту піддається впливу вологи, то виникає місцева гальванічна пара з досить високим значенням термоЕРС, причому полярність цієї пари така, що струм на зовнішній поверхні контакту спрямований від алюмінію до міді, внаслідок чого алюмінієвий провідник може бути сильно зруйнований корозією. Для усунення цього місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні бути ретельно захищені від зволоження.

До недоліків алюмінію слід віднести низьку механічну міцність; відпалений алюміній у три рази менш міцний при розриві, ніж відпалена мідь; питомий опір практично в 1,6 раза більший, ніж у міді; стрімко піддається електролітичній корозії.

### 3.3. Сплави міді та сплави алюмінію

В окремих випадках замість чистої міді в якості провідникового матеріалу застосовуються її сплави з оловом, кремнієм, кадмієм. Такі сплави носять назву *бронз* і при правильно підбраному складі мають значно вищі механічні властивості, ніж чиста мідь.

Бронзи широко застосовують для виготовлення струмоведучих пружин, контактних проводів і т.д. Введення в мідь кадмію при порівняно малій питомій провідності значно підвищує міцність і твердість.

*Кадмієву бронзу* застосовують для контактних проводів і колекторних пластин, а також при виготовленні зварювальних електродів при контактних методах зварювання.

Ще більшою міцністю володіє *берилієва бронза*, для якої межа міцності при розтягу становить  $\sigma_p = 1350$  МПа. Вона використовується при виготовленні щіткотримачів у електричних машинах, струмоштепсельних і ковзаючих контактів.

*Латунь* – сплав міді з цинком, що володіє досить високим відносним видовженням перед розривом при підвищеній, ніж чиста мідь границі міцності. Цинк покращує механічні властивості міді (її міцність, пластичність, корозійну стійкість) і при цьому здешевлює сплав. Це надає латуні технологічні переваги перед міддю під час обробки штампуванням та глибокою витяжкою. У відповідності з цим латунь застосовують для виготовлення різних струмопровідних деталей.

Властивості деяких мідних сплавів наведені в таблиці 3.1. Тут дані в чисельнику для м'якої міді, а в знаменнику – для твердої.

Табл.3.1.

Назва сплаву	$\gamma$ по відношенню до стандарту міді, %	$\sigma_p$ , МПа	$\Delta l/l$ , %
Кадмієва бронза (0,9% <i>Cd</i> )	95/87	310/730	50/4
Бронза (0,8% <i>Cd</i> , 0,6% <i>Sn</i> )	57/53	290/730	55/4
Берилієва бронза <i>БрБ2</i> (2% <i>Be</i> )	30/7	600/1350	40/7
Латунь <i>Л68</i> (68% <i>Cu</i> , 32% <i>Zn</i> )	40/30	380/880	65/5

**Алюмінієві сплави** володіють підвищеною механічною міцністю. Прикладом такого сплаву є альдрей (0,4±0,5% *Mg*; 0,4±0,7% *Si*; 0,2±0,3% *Fe*, усе інше алюміній). Високі механічні властивості альдрей набуває після особливої обробки (загартування – охолодження у воді при температурі 510±550°C. Альдрей у вигляді проводу має густину  $D = 2700 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_p = 350 \text{ МПа}$ ,  $\Delta l/l = 6,5\%$ ,  $\alpha_t = 23 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ,  $\rho = 0,0317 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\alpha_p = 0,0036 \text{ К}^{-1}$ . Таким чином, альдрей, практично зберігає легкість алюмінію і є близьким до нього за питомою провідністю, але за механічною міцністю наближається до твердо-тягнутої міді.

**Сталеалюмінієвий провід** широко застосовується в лініях електропередач і є сердечником, звитим із сталевих жил і обвитим зовні алюмінієвою проволокою.

На рис.3.10 показано залежність повного перерізу сталеалюмінієвого проводу марки АС (1), перерізу сталевих сердечників (2) і активного електричного опору (при промисловій частоті 50 Гц) одиниці довжини проводу (3) від зовнішнього діаметра проводу  $D$ .

У проводах такого типу механічна міцність визначається в основному сталевим сердечником, а електрична провідність – алюмінієм. Збільшений зовнішній діаметр сталеалюмінієвого проводу в порівнянні з мідним на лініях передач високої напруги є перевагою, оскільки знижується небезпека виникнення корони внаслідок зниження напруженості електричного поля на поверхні проводу.

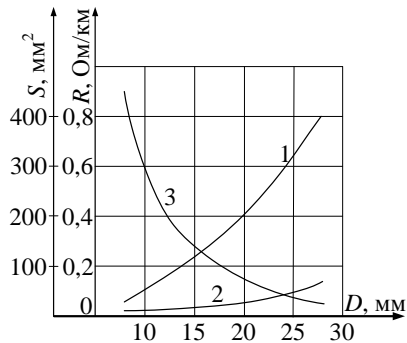


Рис.3.10. Характеристики сталеалюмінієвого проводу

### 3.4. Залізо та його сплави

*Залізо (сталь)* як найбільш дешевий і доступний метал, що володіє високою механічною міцністю, часто використовується і в якості провідникового матеріалу. Чисте залізо має високі в порівнянні з міддю і алюмінієм значення опору. Як було сказано вище, при змінному струмі в сталі, як в феромагнітному матеріалі виникає поверхневий ефект, тому у відповідності до законів електротехніки активний опір сталевих провідників змінному струму вищий, ніж постійному струму [3]. Крім цього, на змінному струмі в сталевих провідниках з'являються втрати на гістерезис.

В якості провідникового матеріалу застосовується сталь із вмістом вуглецю ( $0,1 \div 0,15\%$ ), що має границю міцності під час розтягу  $\sigma_p = 750$  МПа,  $\Delta l/l = 7\%$  і питому провідність  $\gamma$  в  $6 \div 7$  разів меншу в порівнянні з міддю. Таку сталь використовують у якості матеріалу для проводів повітряних ліній при передачі невеликих потужностей. В подібних випадках застосування сталі може бути достатньо вигідним, так як при малій силі струму переріз проводу визначається не електричним опором, а його механічною міцністю.

Сталь як провідниковий матеріал використовується також у вигляді шин та в контактній мережі електротранспорту. Для осердь сталевих алюмінієвих проводів повітряних ліній електропередач застосовується особливо міцна сталевий проволочка, що має границю міцності при розтягу  $\sigma_p = 1200 \div 1500$  МПа,  $\Delta l/l = 5\%$ . Звичайна сталь володіє низькою стійкістю до корозії: навіть за нормальної температури, особливо в умовах високої вологості, вона швидко іржавіє; при підвищенні температури швидкість корозійних процесів різко зростає. Тому поверхня сталевих проводів повинна бути захищена шаром більш стійкого матеріалу. Зазвичай для цього використовують покриття цинком. Залізо має високий температурний коефіцієнт питомого опору, тому тонку залізну проволочку, що поміщена для захисту від окислення в балон, заповнений воднем або іншим хімічним неактивним газом, можна застосовувати в баретерах, тобто пристроях, що використовують залежність опору від сили струму.

В деяких випадках для зменшення витрат кольорових металів в провідникових конструкціях вигідно застосувати так звані провідникові *біметали*. Це сталь, покрита ззовні шаром міді, причому обидва метали з'єднані один з одним міцно і неперервно по всій поверхні їх дотику. Біметал має механічні та електричні властивості, що є проміжними між властивостями суцільного мідного і су-

цільного сталюго провідників того ж перерізу. Міцність біметалу вища, ніж міді, але електрична провідність менша. Розміщення міді ззовні, а сталі всередині конструкції, а не навпаки, є досить важливо: з одного боку при змінному струмі досягається більш висока провідність всього проводу, з другого – мідь захищає розміщену під нею сталь від корозії.

Біметалічна проволока випускається зовнішнім діаметром від 1 до 4 мм і з вмістом міді не менше 50% повної маси проволоки. Значення  $\sigma_p$  (з розрахунку на повний переріз проволоки) повинно бути не менше 550÷700 МПа, а  $\Delta l/l$  – не більше 2%. Опір 1 км біметалічної проволоки постійному струму (при 20 °С) в залежності від діаметра складає від 60 (при 1мм) до 4 Ом/км (при 4 мм). Біметалічну проволоку застосовують для ліній зв'язку, ліній електропередач, в розподільчих пристроях, різноманітних струмопровідних частинах електричних апаратів тощо.

Як приклад застосування біметалевого провідника розглянемо задачу на визначення його опору. Біметалевий провідник має довжину  $l = 10$  м, діаметри зовнішній (міді)  $d_1 = 0,01$  м, внутрішній (сталі)  $d_2 = 0,07$  м.

Загальний опір біметалу визначаємо як паралельне ввімкнення шарів сталі та міді.

$$\frac{1}{R_{Cu-Fe}} = \frac{1}{R_{Cu}} + \frac{1}{R_{Fe}}; \quad R_{Cu-Fe} = \frac{R_{Cu} \cdot R_{Fe}}{R_{Cu} + R_{Fe}}.$$

Визначаємо опори міді і сталі через їх геометричні розміри.

$$\begin{aligned} R_{Cu} &= \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{S_{Cu}} = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{\frac{\pi d_1^2 - \pi d_2^2}{4}} = \rho_{Cu} \cdot \frac{4l}{\pi d_1^2 - \pi d_2^2} = \\ &= 0,017 \text{ мкОм} \cdot \text{м} \cdot \frac{4 \cdot 10 \text{ м}}{3,14 \cdot 0,01^2 - 0,007^2 \text{ м}^2} = 42,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

де  $S_{Cu}$  – площа мідного диска.

$$\begin{aligned} R_{Fe} &= \rho_{Fe} \frac{l}{S_{Fe}} = \rho_{Fe} \frac{4l}{\pi d_2^2} = \\ &= 0,098 \text{ мкОм} \cdot \text{м} \cdot \frac{4 \cdot 10 \text{ м}}{3,14 \cdot 0,007^2 \text{ м}^2} = 254,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}. \end{aligned}$$



$$R_{Cu-Fe} = \frac{42,5 \cdot 10^{-4} \cdot 254,8 \cdot 10^{-4}}{42,5 + 254,8 \cdot 10^{-4}} = 36,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Тобто опір біметалевого провідника є меншим від суцільного мідного приблизно на 15%.

### 3.5. Сплави високого опору

При використанні сплавів високого опору для електровимірювальних пристроїв і еталонних резисторів, крім високого питомого опору  $\rho$ , вимагається й висока стабільність  $\rho$  в часі, малий температурний коефіцієнт питомого опору і малий коефіцієнт термоЕРС в парі даного сплаву з міддю. Сплави для електронагрівальних приладів повинні довготривало працювати на повітрі за високих температур (інколи до 1000 °С і вище). Крім того, в багатьох випадках вимагається технологічність сплавів – можливість виготовлення з них гнучкої проволочки діаметром сотих долей міліметра. Для отримання особливо високих значень питомого опору застосовують матеріали, що мають високий опір в масивному стані (сплави, оксиди, сіліциди) і в дрібнозернистому вигляді.

Провідникові сплави високого опору за призначенням і властивостями розділяють на резистивні і нагрівостійкі.

Із сплавів для резисторів найбільше поширення отримали сплави на основі міді і нікелю, зокрема манганін і константан.

**Манганін** – сплав на основі міді, що отримав свою назву через наявність в ньому марганцю (до 12%), що широко застосовується для виготовлення еталонних резисторів. Жовтий колір пояснюється великим вмістом міді – 85%, решта 3% – нікель. Манганін може витягуватись в тонку проволочку, що може мати емалеву ізоляцію. Мікропровід з манганіну в скляній ізоляції виготовляють діаметром в декілька мкм. Мікропровід використовують для конструювання мініатюрних високоточних елементів. Скляна ізоляція такого проводу характеризується високими електроізоляційними властивостями, підвищеною нагрів- і вологостійкістю. Недоліком є її крихкість. Для забезпечення стабільності опору і зниження  $TK_p$  проволочку піддають тепловому старінню: обпалюванню у вакуумі за температури 550÷600 °С з подальшим повільним охолодженням. Гранично допустима робоча температура сплавів цього типу не перевищує 200 °С. Механічні властивості манганіну:  $D = 8400 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_p = 450\div 600 \text{ МПа}$ ;  $\Delta l/l = (15\div 30)\%$ ,  $\rho = (0,47\div 0,48) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\alpha_p = (10\div 15) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ .

**Константан** – сплав, що повинен мати більше 60% міді і 40% нікелю для забезпечення мінімуму  $\alpha_p$  в системі *Cu-Ni* при досить високому опорі  $\rho$ . Назва константан пояснюється стабільністю питомого опору  $\rho$  в широкому діапазоні зміни температури. Сплав добре піддається обробці, його можна протягнути в проволочку діаметром  $10 \div 20$  мкм. Температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_p = -(5 \div 20) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  при  $\rho = (0,48 \div 0,52) \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ . За механічними властивостями константан близький до манганіну:  $\sigma_p = 400 \div 500 \text{ МПа}$ ,  $\Delta l/l = (20 \div 40) \%$ ,  $D = 8900 \text{ кг/м}^3$ .

На рис.3.11 зображено залежності питомого опору  $\rho$ , коефіцієнта теплопровідності  $\gamma_T$ , контактної термоЕРС  $E$  у парі з міддю, температурного коефіцієнта питомого опору  $\alpha_p$  від процентного вмісту міді і нікелю у сплаві.

Нагрівостійкість константану вища, ніж у манганіну, гранично допустима температура під час довготривалої роботи досягає  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Утворюється плівка оксиду, що володіє електроізоляційними властивостями. Це дає змогу застосовувати константан без спіральної міжвиткової ізоляції для виготовлення реостатів чи нагрівальних елементів. Однак в парі з міддю константан розвиває високу термоЕРС ( $45 \div 55 \text{ мкВ/К}$ ). Це затруднює використання константанових резисторів у точних вимірювальних схемах, особливо при нульових вимірах в мостових і потенціометричних системах.

Але ця ж властивість константану дає змогу використовувати його в парі з міддю чи залізом при виготовленні термопар, що служать для вимірювання та контролю температури.

Однак наявність у складі константану великої кількості дефіцитного нікелю обмежує його використання у виробах масового застосування. Висока нагрівостійкість таких елементів пояснюється введенням до їх складу значної кількості металів, що мають високі значення об'ємного коефіцієнта

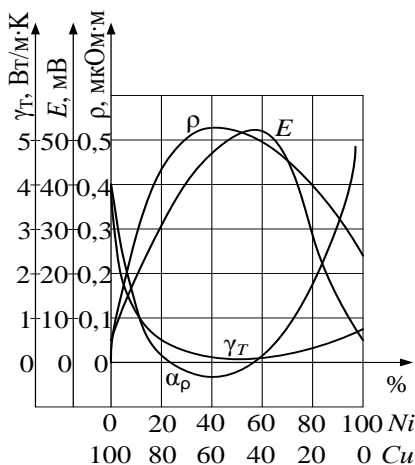


Рис.3.11. Залежності параметрів сплавів *Cu-Ni* від їх складу

оксидації, що дає змогу під час нагріву на повітрі утворювати оксидну плівку. Такими металами є нікель, хром та алюміній. Залізо, навпаки, має низький коефіцієнт оксидації, тому при нагріванні легко окислюється. Чим більший вміст заліза у сплаві, наприклад з нікелем і хромом, тим цей сплав є менш нагрівостійким.

**Нікелін.** Через менший вміст нікелю сплав дешевший, проте його питомий опір менше ніж у константану ( $\rho = 0,35$  мкОм·м). Крім того, температурний коефіцієнт питомого опору сплаву не дорівнює нулю,  $\alpha_p = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Найпоширеніша марка нікеліну МНМц 30-1,5 (68,5% *Cu*; 30% *Ni*; 1,5% *Mn*). Зазвичай цей сплав використовують для виготовлення пускових і регулювальних реостатів.

**Нейзільбер** – «нове срібло» МНЦ 15-20 (65% *Cu*, 15% *Ni*, 20% *Zn*). Заміна нікелю дешевшим цинком призводить до суттєвого зменшення вартості сплаву. Разом з тим сплав володіє достатньо високим питомим опором ( $\rho = 0,3$  мкОм·м). Такий високий питомий опір викликаний тим, що розмір іона цинку менший розміру іона міді, а розмір іона нікелю більший розміру іона міді. Тому сумарні спотворення кристалічної решітки великі, що ускладнює поширення електронної хвилі. Нейзільбер володіє достатньою пружністю, що дає змогу використовувати його для виготовлення пружних елементів (пружин, мембран).

Сплави системи *Fe-Ni-Cr* називають **ніхромами** або (при підвищеному вмісті *Fe*) **фероніхромами**. Сплави системи *Fe-Cr-Al* називають **фехрелями** і **хромалями**.

Стійкість хромонікелевих сплавів при високій температурі в навколишньому середовищі пояснюється близькими значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення цих сплавів і їх оксидних плівок. Тому розтріскування оксидних плівок має місце тільки за різких змін температур. Тоді при подальших нагрівах кисень буде проникати в утворені тріщини і призводити до подальшого окислення сплаву. Тому при багатократному короткочасному ввімкненні електронагрівального елемента з ніхрому він може перегоріти значно швидше, ніж при неперервній роботі елемента за цієї ж температури. Строк експлуатації елементів з ніхрому та інших нагрівостійких сплавів суттєво скорочується при наявності коливань перерізу проволочки: в місцях із зменшеним перерізом нагрівальні елементи перегріваються і легше перегорять. Довготривалість роботи електронагрівальних елементів з ніхрому та анало-

гічних сплавів може бути суттєво збільшена, якщо доступ повітря буде обмежений. В трубчастих нагрівальних елементах спіраль із сплаву високого опору проходить по осі трубки із стійкого до окислення металу. Проміжок між проволокою і трубкою заповнюється порошком діелектрика з високою теплопровідністю (наприклад, магnezій  $MgO$ ). При додатковій протяжці цієї трубки її зовнішній діаметр зменшується, магnezія ущільнюється і утворює механічно міцну ізоляцію внутрішнього провідника.

Хромо-алюмінієві сплави набагато дешевші ніхромів, оскільки хром і алюміній порівняно дешеві і легкодоступні. Однак ці сплави менш технологічні, більш тверді і крихкі, з них можуть бути отримані проволочки і стрічки лише великого поперечного перерізу, ніж з ніхромів. Тому ці сплави в основному використовуються в електротермічній техніці для нагрівальних пристроїв великої потужності і промислових електричних печей.

Основні характеристики сплавів наведені в таблиці 3.2.

Табл.3.2.

Марка сплаву	Склад, % по масі *				$D$ , Мгр/м <sup>3</sup>	$\rho$ , мкОм·м	$TK\rho$ , $\cdot 10^{-6} K^{-1}$	$T_{zp}$ , °C
	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Al</i>				
<b>X15H60</b>	15÷18	55÷61	1,5	–	8,2	1,1÷1,2	100÷200	1000
<b>X20H80</b>	20÷23	75÷78	1,5	–	8,4	1,0÷1,1	100÷200	1100
<b>X13Ю4</b>	12÷15	0,6	0,7	3,5÷5	7,3	1,2÷1,4	100÷120	900
<b>X23Ю5</b>	22÷25	0,6	0,7	4,5÷5	7,2	1,3÷1,5	65	1200

\* – все інше залізо.

Для порівняння, наприклад, ніхрому з міддю, визначимо довжини спіралей їх провідників діаметром  $d = 0,2$  мм для нагрівального елемента потужністю  $P = 2$  кВт, що працює на змінному струмі з напругою  $U = 220$  В.

Нагрівальний елемент в колах змінного струму характеризується коефіцієнтом потужності  $\cos\phi = 1$ . Тобто, струм і напруга співпадають за фазою і формули розрахунку однакові і для постійного, і для змінного струму.

Формула потужності:

$$P = UI \cos\phi = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R.$$

Опір провідника

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{U^2}{P}.$$

Звідси

$$l = \frac{U^2 S}{\rho P} = \frac{\pi d^2 U^2}{4 \rho P}.$$

Для мідного провідника:

$$l_m = \frac{\pi d^2 U^2}{4 \rho_m P} = \frac{3,14 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 220^2}{4 \cdot 0,017 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 44,7 \text{ м.}$$

Для ніхромового провідника:

$$l_n = \frac{\pi d^2 U^2}{4 \rho_n P} = \frac{3,14 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 220^2}{4 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 0,69 \text{ м.}$$

Тобто, для забезпечення однакової потужності довжина ніхромового провідника буде меншою від мідного в  $\rho_n / \rho_m = 65$  разів.

### 3.6. Контактні матеріали

Найбільш поширеними контактами, що застосовуються в електрорадіотехніці, є контакти, які служать для періодичного замикання і розмикання електричних кіл (розривні і ковзаючі). В якості контактних матеріалів використовуються чисті тугоплавкі метали і різноманітні сплави, а також металокерамічні композиції.

Ковзаючі контакти забезпечують перехід електричного струму від нерухомих частин пристрою до рухомих, наприклад в потенціометрах, реостатах, електричних машинах.

Розривні контакти забезпечують періодичне замикання чи розмикання електричних кіл протягом тривалого часу, зокрема, в таких пристроях як реле, пускачі, електромеханічні перетворювачі.

Матеріали для таких контактів повинні мати такі властивості:

- 1) малий питомий електричний опір;
- 2) малий спад напруги на контактах;
- 3) стійкість до механічного і електричного зносу;
- 4) не допускати ерозії (вигоряння) контактуючих поверхонь;
- 5) не допускати приварювання контактних поверхонь одна з одною при дії електричної дуги при розмиканні контактів;
- 6) стабільність контактного електричного опору.

Контакт повинен бути надійним з'єднанням, здатним проводити струм з низьким і стабільним в часі електричним опором.

Структура площі контакту складається з ділянок з металічним контактом, опір яких визначається сумарним опором металів пари, що утворюють контакт, через який протікає струм без перехідного опору; контактних ділянок, покритих тонкими адгезійними плівками, що пропускають струм завдяки тунельному ефекту; ізолюючих ділянок, покритих плівками оксидів і сульфідів, що не пропускають електричний струм.

Загальна площа контакту є сумою площ цих ділянок, що значно менша контактної поверхні, так званої умовної площі контакту. При цьому стан поверхонь контактів безпосередньо впливає на перехідний опір і нагрівання контактів при проходженні через них струму.

Основні причини зносу контактів під час їх експлуатації залежать від умов експлуатації і зводяться до таких:

- 1) ерозія контактів – порушення форми робочих поверхонь;
- 2) перенос матеріалу з одного контакту на інший, утворення кратерів, і навіть заклинювання контактів;
- 3) електричний знос контактів, зумовлений електричною дугою, іскрінням контактів при розмиканні і вібрацією контактів;
- 4) механічний знос, пов'язаний не тільки з силою удару контактів, але й з контактним тиском і частотою замикань контакту;
- 5) хімічний знос, на який впливають склад навколишнього середовища, його вологість та температура.

Для зменшення дії ерозії необхідна висока температура плавлення контактних матеріалів.

Вибір матеріалів для розмикаючих контактів проводять за значеннями комутованого струму або за потужністю розмикання електричних кіл.

За значенням комутованого струму розривні контакти поділяють на слабострумові (до одиниць ампер) і сильнострумові (десятки, сотні ампер).

Слабострумові (малопотужні) розмикаючі контакти виготовляють з благородних і тугоплавких металів та сплавів на їх основі.

Основні області застосування контактних матеріалів:

- 1) *срібло* – реле, сигнальна апаратура, телефонна і телеграфна апаратура, управління флуоресцентними лампами, контакти допоміжних кіл контакторів і магнітних пускачів;

2) *срібло-мідь-нікель* – реле вуличних сигналів, перетворювачі струму, реле автоматики, електромагнітні лічильники, автомобільні і залізничні сигнальні реле;

3) *срібло-кадмій* – реле, термостати холодильників, стартери, теплові вимикачі;

4) *срібло-оксид міді* – контактори змінного і постійного струму, автоматичні запобіжники;

5) *мідь-вольфрам* – потужні масляні і повітряні високовольтні вимикачі дугових печей та перетворювачі струму.

6) *срібло-вольфрам* – магнітні пускачі і контактори з високою частотою ввімкнень, вимикачі побутових приладів, кнопки керування, високовольтні вимикачі, випрямлячі струму.

Більшість благородних металів застосовують для контактів у вигляді гальванічного покриття (крім срібла, яке може застосовуватись в чистому вигляді). Гальванічні покриття більш зносостійкі в електричному полі. Товщина гальванопокриття зазвичай коливається в межах від одного до декількох десятків мікрометрів.

Сильнострумові (потужні) розмикаючі контакти виготовляють з металокерамічних матеріалів, що отримуються методом порошкової металургії. Металокерамічні контакти володіють рядом переваг в порівнянні зі звичайними металічними:

1) більш стійкі до приварювання та зносу;

2) значно збільшують термін служби контактів при середніх навантаженнях;

3) підвищують надійність і довговічність конструкції апаратів при значній економії срібла.

Металокерамічні матеріали для контактів через які протікають високі струми повинні складатись із невзаємодіючих один з одним компонентів.

Срібло і мідь забезпечують високу електро- і теплопровідність, а тугоплавка частина підвищує зносостійкість, термостійкість і опір до зварювання контактів. У низьковольтних апаратах часто використовується срібло-оксид кадмію, для високовольтних (дугогасних камер) – залізо-мідь-вісмут та ін.

Матеріали для ковзаючих контактів повинні мати малий питомий опір, високу стійкість до стирання, витримувати роботу на високих швидкостях.

Матеріали для ковзаючих контактів можна розділити на пружинні металічні та електротехнічні вугільні.

Як пружинні металічні контактні матеріали використовують спеціальні сорти бронз, наприклад кадмієві та берилієві, про які було згадано в п.3.3.

З числа твердих неметалічних провідникових матеріалів найбільше значення мають матеріали на основі вуглецю (електротехнічні вугільні вироби, скорочено – електровугільні вироби). З вугілля виготовляють щітки електричних машин, електроди для прожекторів, для дугових електричних печей і електролітичних ванн, анодів гальванічних елементів, високоомних резисторів, розрядників для телефонних мереж.

В якості сировини для виробництва електровугільних виробів можна використовувати сажу, графіт або антрацит. Для отримання стержневих електродів подрібнена маса із зв'язуючими речовинами, в якості яких використовуються кам'яновугільна смола, а інколи і рідке скло, формується в прес-формах. При високих температурах досягається штучне переведення вуглецю в форму графіту і такий процес називають *графітуванням*.

**Природний графіт** – шаровий матеріал, один з різновидів чистого вуглецю. Його фізичні властивості в напрямі шарів і перпендикулярно до них різні, тобто він характеризується анізотропією як електричних, так і механічних параметрів. У напрямі шарів електропровідність графіту має металічний характер ( $\rho = 8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\alpha_p = -10^{-4} \text{ К}^{-1}$ ). Окремі частинки графіту легко відділяються і ковзають по його поверхні. Ця властивість використовується в техніці для виготовлення сухих змазок на основі графіту.

**Сажа** є мілкодисперсним вуглецем з домішкою смолистих речовин. Для них характерний широкий діапазон питомого опору ( $\rho = 0,01 \div 400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ).

Електричні щітки застосовують в електричних машинах як змінного, так і постійного струму різного призначення і потужності, в тому числі і в швидкохідних машинах з кільцями для підведення або знімання електричного струму.

Обпалювання щіток для електричних машин проводять при температурі близько  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ; графітовані щітки піддають температурі до  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для різних марок щіток характерні визначені значення питомого опору, допустимої густини струму, лінійної швидкості на колекторі, коефіцієнта тертя і т.д.

Розрізняють щітки вугільно-графітні (УГ), графітні (Г), електрографітовані (ЕГ), мідно-графітні (МГ). Щітки із вмістом порош-



кового металу характеризуються особливо малим електричним опором і викликають незначне контактне падіння напруги (між щіткою і колектором). Основні параметри вугільних щіток зображені в таблиці 3.3.

Табл.3.3.

Типи щіток	Питомий опір $\rho$ , мкОм·м	Допустима густина струму $J$ , А/мм <sup>2</sup>	Допустима лінійна швидкість $V$ , м/с
УГ	18÷60	6÷8	10÷15
Г	10÷45	7÷11	12÷25
ЕГ	10÷45	9÷11	25÷45
МГ	0,05÷1,2	12÷20	12÷25

### 3.7. Надпровідники і кріопровідники

До кріопровідників і надпровідників належать метали, що працюють при дуже низьких температурах, що наближаються до абсолютного нуля. Явище надпровідності було відкрито В. Камерлінг-Оннесом в 1911 році. Ним було виявлено, що під час охолодження до температури скраплення гелію (4,2 К) опір замороженої ртуті різким стрибком падає практично до нуля ( $10^{-25}$  Ом·м), що в  $10^{17}$  разів менше опору міді. В наш час відомо 35 таких металів і більше тисячі сплавів та хімічних з'єднань, у яких за дуже низьких температур питома провідність стає нескінченною величиною. Ряд елементів проявляє надпровідні властивості при низьких тисках, наприклад, такі напівпровідники, як кремній, германій, селен, сурма та ін. Разом з тим такі метали як мідь, срібло, платина, золото та інші перевести в надпровідний стан не вдалося. Наявність у речовини такої провідності називається надпровідністю, а температура, при якій речовина переходить у надпровідний стан, називається температурою надпровідного переходу ( $T_c$ ). Матеріали, що переходять у надпровідний стан, називаються надпровідниками. Цей перехід є оборотним процесом: при підвищенні температури до значення  $T_c$  надпровідність зникає і матеріал переходить у звичайний стан з кінцевим значенням провідності.

Явище надпровідності відповідно до квантової теорії виникає в результаті притягання електронів один до одного. Таке притягання можливе тільки в середовищі, що містить позитивно заряджені іони, поле яких послабляє сили кулонівського відштовхування між електронами. Притягаються тільки ті електрони, які беруть участь

у процесі електропровідності. У результаті такого притягання електронів з протилежними напрямками імпульсів і спінів утворюють так звані куперовські пари. Вирішальну роль в утворенні цих пар відіграє взаємодія електронів з тепловими коливаннями ґратки – фононами. Обмінна фононна взаємодія й викликає сили притягання між електронами. Електрон, що рухається серед позитивно заряджених іонів, електростатичними силами притягає до себе найближчі іони. Внаслідок такого зсуву іонів у зоні траєкторії електрона локально зростає густина позитивного заряду. Другий електрон, що рухається услід за першим, може притягатися областю з надлишковим позитивним зарядом. За рахунок непрямої взаємодії з ґратками між першим і другим електронами виникають сили притягання. Другий електрон взаємодіє з першим, при цьому утворюючи куперовську пару. При абсолютному нулі всі електрони зв'язані в пари. При підвищенні температури за рахунок теплової енергії відбувається розрив деяких електронних пар.

Перехід речовини в надпровідний стан при його охолодженні відбувається в дуже вузькому діапазоні температур (соті частки градуса). Установлено, що порушення надпровідності відбувається не тільки при підвищенні температури, що перевищує значення  $T_c$ , але також у разі виникнення на поверхні надпровідника магнітного поля з магнітною індукцією, яка перевищує значення індукції переходу  $B_c$ . Причому для чистих надпровідникових металів – *надпровідників першого роду* (свинець, ртуть, індій, олово, алюміній) немає значення, чи створюється ця індукція струмом, що протікає по надпровіднику, чи зовнішнім джерелом магнітного поля. У надпровідників першого роду цей перехід відбувається стрибкоподібно, як тільки напруженість поля досягне критичного значення. На сьогодні вже відомо ряд матеріалів з температурою  $T_c > 100$  К.

*Надпровідники другого роду* переходять з одного стану в інший поступово; для них розрізняють нижню  $H_{c1}$  і верхню  $H_{c2}$  критичні напруженості поля. В інтервалі між ними матеріал перебуває в проміжному гетерогенному стані, в якому співіснують нормальна й надпровідна фази. Співвідношення між ними залежить від напруженості поля. Надпровідниками другого роду в основному є інтерметалічні з'єднання й сплави. Із чистих металів до надпровідників другого роду можна віднести лише ніобій, ванадій і технецій.

Критична напруженість магнітного поля для надпровідників першого роду становить близько  $10^5$  А/м, а для надпровідників дру-

ного роду значення верхньої критичної напруженості може перевищувати  $10^7$  А/м.

Слід зазначити, що особливістю надпровідників є те, що магнітне поле не проникає в товщу зразка. Силкові лінії поля обгинають надпровідник. Це явище зумовлене тим, що в поверхневому шарі надпровідника виникає круговий незатухаючий струм, що повністю компенсує зовнішнє поле в товщині зразка. В результаті цього надпровідники є ідеальними діамагнетиками з магнітною проникністю, що дорівнює нулю. Експериментально це підтвердив В.К. Аркад'єв, продемонструвавши дослід, коли постійний магніт висів у повітрі над кільцем з надпровідного матеріалу, в якому циркулювали індуквані магнітом незатухаючі струми [3].

Однак розподіл речовин за їхніми надпровідними властивостями на два види не є абсолютним. Будь-який надпровідник першого роду можна перетворити в надпровідник другого роду, якщо створити в ньому достатню концентрацію дефектів кристалічних ґраток. Надпровідність ніколи не спостерігається в системах, в яких існує феро- і антиферромагнетизм.

Утворенню надпровідного стану в напівпровідниках і діелектриках перешкоджає мала концентрація вільних електронів. Але в матеріалах з великою діелектричною проникністю сили кулонівського відштовхування між електронами слабкі, тому в деяких з них може спостерігатися явище надпровідності.

Параметри деяких надпровідників подано в таблиці 3.4.

Табл.3.4.

Надпровідник	Температура переходу $T_c$ , К	Критичне значення індукції, $B_c$ , Тл
Алюміній <i>Al</i>	1,2	0,01
Олово <i>Sn</i>	3,7	0,031
Індій <i>In</i>	3,4	0,03
Ртуть <i>Hg</i>	4,2	0,46
Свинець <i>Pb</i>	7,2	0,08

Надпровідники знаходять застосування для виготовлення магнітних систем, що втримують плазму в реакторах керованого термоядерного синтезу, в магнітогідродинамічних (МГД) перетворювачах теплової енергії в електричну, як індуктивні накопичувачі енергії для покриття пікових потужностей. Застосування надпровідників в електричних машинах для створення обмоток збудження

дає змогу виключити з машин осердя з електротехнічної сталі. Проводяться дослідження зі створення надпровідних ліній електропередачі на постійному й змінному струмах. Перспективним є створення надшвидкісного транспорту на магнітній подушці.

Поряд з надпровідністю в сучасній техніці використовується явище кріопровідності, тобто робота металу при кріогенних температурах, коли опір стає дуже малим, але є кінцевою величиною. Метали, що володіють такою властивістю, але без переходу в надпровідний стан, називаються кріопровідниками. Як правило, використовуються метали, що мають при кріогенних температурах, які є вищими температур надпровідності, найменше значення питомого опору.

Природно, що кріопровідники, у яких при зміні температури в широких межах питомий опір  $\rho$  змінюється плавно, без стрибків, не можуть використовуватися в ряді пристроїв, принцип роботи яких заснований на тригерному ефекті появи і відсутності надпровідності. Найбільший інтерес для використання як кріопровідника, крім звичайних провідникових матеріалів – алюмінію і міді, викликає застосування берилію.

Берилій значно дорожчий і складніший у технологічному відношенні. Ряд сполук берилію сильно токсичні, але берилій при охолодженні рідким азотом має найменше, в порівнянні з алюмінієм і міддю, значення  $\rho$ . Очевидно, що робота з досить дешевим рідким азотом значно простіша, ніж робота з рідким воднем. В усіх випадках для одержання кріопровідникових матеріалів потрібна висока чистота металу і неможливість наклепу. Шкідливий вплив домішок при кріогенних температурах проявляється набагато різкіше, ніж при нормальній температурі. Кріопровідники можуть з успіхом використовуватися для обмоток електричних машин і трансформаторів, для струмопровідних жил кабелів тощо.

### **3.8. Тугоплавкі провідникові матеріали**

Метали з температурою плавлення більше 1700 °С відносять до тугоплавких. Характерно, що ці метали, як правило, хімічно стійкі за низьких температур, але при підвищених температурах активно взаємодіють з атмосферою. Тому вироби з них (електроди, нагрівачі, катоди) експлуатують у вакуумі або в середовищі інертних газів. Механічна обробка тугоплавких металів затруднююча, оскільки в них підвищена твердість і крихкість.

**Вольфрам** – важкий і твердий метал сірого кольору. Із всіх металів він володіє найбільш високою температурою плавлення. Вольфрам отримують з руд різного складу. Проміжним продуктом є вольфрамова кислота  $M_2WO_4$ , з якої „відновленням” воднем при нагріванні до 900 °С отримується металічний вольфрам у вигляді дрібного порошку. З цього порошку при високому тиску пресують стержні, які піддають складній термічній обробці в атмосфері водню (для уникнення впливу кисню). Для вольфраму характерна слабка зв’язаність окремих кристалів, тому при зернистій будові порівняно товсті вольфрамові вироби крихкі і легко ламаються.

При механічній обробці вольфрам набуває волокнистої структури. Цим і пояснюється гнучкість тонких вольфрамових ниток. Із зменшенням товщини вольфрамової проволочки сильно збільшується і її границя міцності при розтягу (від 500÷600 МПа) для стержнів діаметром 5 мм, до 3000÷4000 МПа для тонких ниток, відносно видовження перед розривом 4 %. Вольфрам є одним з важливих матеріалів для електровакуумної техніки.

На рис. 3.12 показано температурні залежності теплоємності  $c$ , коефіцієнта електропровідності  $\gamma_T$ , коефіцієнта лінійного розширення  $\alpha_l$ , питомого опору  $\rho$  для вольфраму.

Вольфрам застосовують також для виготовлення контактів, які є стійкими в роботі, мають малий механічний знос завдяки високій твердості матеріалу, здатні протистояти діям дуги, стійкі до корозії.

Недоліками вольфраму як контактної матеріалу є утворення оксидних плівок, необхідність застосування високого тиску для забезпечення малого опору контакту.

Завдяки тугоплавкості і великій механічній міцності за підвищених температур вольфрам може працювати при високій температурі (більше 2000 °С), але лише у вакуумі чи в інертному газі

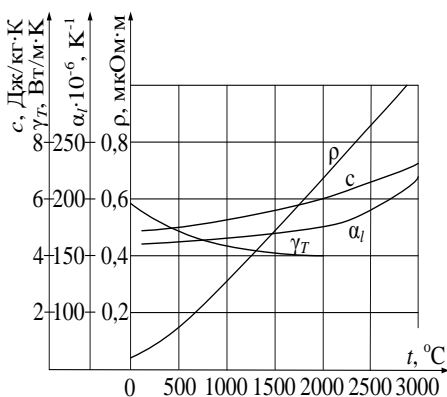


Рис.3.12. Залежності  $c = f(T)$ ,  $\gamma_T = f(T)$ ,  $\alpha_l = f(T)$ ,  $\rho = f(T)$

(азот, аргон), так як вже при нагріві до температури декількох сотень градусів Цельсія в присутності кисню він сильно окислюється.

Вольфрам порівняно дорогий і тому застосовується тільки там, де його не можна замінити.

**Молібден** широко застосовують в електровакуумній техніці за менш високих температур, ніж вольфрам; накалиючі деталі з молібдену повинні працювати у вакуумі чи в інертному газі. Має найменший питомий опір із всіх термоплавких матеріалів (металів). Структура кованиого молібдену така ж як і вольфраму. Однак нагрітий у високій температурі дрібнозернистий молібден характеризується хорошою пластичністю і його механічна обробка не викликає особливих затруднень.

Механічні властивості молібдену в значній мірі залежать від термічної і механічної обробки матеріалу, виду і розрізу виробу. Для потреб електровакуумного виробництва промисловість випускає особливо чистий молібден (*ОЧМ*) із вмістом домішок не більше 0,02%, чистий молібден (*МЧ*) і молібден з присадкою оксиду кремнію (*МК*). Марка *МК* відрізняється від інших підвищеною механічною міцністю за високих температур. Це кращий матеріал для виготовлення деталей складної конфігурації (електроди, нагрівачі електропечей і т.д.).

Значення температурного коефіцієнта лінійного розширення  $TK_l$  молібдену близьке до  $TK_l$  кремнію і германію, що дає змогу використовувати його разом з вольфрамом в корпусах потужних високочастотних напівпровідникових пристроїв для тепловідводу. В парі з вольфрамом молібден використовують для виготовлення термопар.

**Тантал** – метал, що отримується з малопоширеної руди – танталіту  $Fe(TaO_3)_2$  методами порошкової металургії подібно до вольфраму і молібдену. Основна відмінність його полягає лише в тому, що процес загартування здійснюють у вакуумних печах. Це пов'язано з тим, що тантал схильний до поглинання газів, внаслідок чого він стає крихким. Механічні операції кування і протяжки на відміну від вольфраму і молібдену проводять при кімнатних температурах. Тантал виготовляють у вигляді дроту, прутків, листів, стрічок та фольги товщиною до 10 мкм. У виробництві використовують матеріал *T* (тантал підвищеної чистоти), *ТЧ* (тантал високої чистоти) і сплави танталу з ніобієм, що маркуються *ТН*. Тантал характеризується високою пластичністю навіть при кімнатній температурі. Межа міцності його при розтягуванні може змінюватися залежно від механічної і термічної обробки від 350 до 1250 МПа. При

нагріванні та окисленні на повітрі на поверхні танталу утворюється щільна плівка оксиду  $Ta_3O_5$ , яка не розкладається аж до температури 1500 °С. На противагу вольфраму і молибдену тантал не стає крихким при нагріванні у вакуумі до дуже високих температур.

Здатність танталу поглинати гази в діапазоні температур (600÷1200) °С в поєднанні з тугоплавкістю, хорошою пластичністю ставлять цей метал в ряд найважливіших матеріалів електровакуумної техніки. Проте через дефіцитність та відносно високу вартість тантал використовується переважно для пристроїв, що працюють в посиленому тепловому режимі, або в тих випадках, коли до вакууму пред'являють жорсткі вимоги. Зокрема, з танталу виготовляють аноди і сітки генераторних ламп та різні допоміжні деталі електровакуумних приладів.

Особливе значення тантал має при виробництві конденсаторів. Широке застосування отримали електролітичні і тонкоплівкові конденсатори. Тантал є металом, що легко утворює однорідні плівки у водних розчинах електролітів. Завдяки підвищеній діелектричній проникності оксиду танталу  $Ta_3O_5$  ( $\epsilon = 25$ ) такі конденсатори характеризуються великою питомою ємністю. Перспективним в наш час також є виробництво танталових резисторів.

### 3.9. Плівкові резистивні матеріали

Плівкові резистивні матеріали отримують з вихідних матеріалів у процесі отримання резистивних плівок. Властивості таких плівок суттєво відрізняються від властивостей вихідних матеріалів. Тонкі плівки наносять на ізоляційну основу (підложку) методом термічного випаровування у вакуумі. Як основу використовують скло, кераміку, ситал, шарові пластики та ін.

До матеріалів, що застосовуються для виготовлення плівкових резисторів, висуваються такі вимоги:

- 1) можливість виготовлення стабільних у часі резисторів з низьким температурним коефіцієнтом питомого опору  $\alpha_p$ ;
- 2) висока адгезія до підкладок;
- 3) висока корозійна стійкість;
- 4) стійкість до довготривалої дії високих температур.

В залежності від вихідних матеріалів плівкові резистори поділяють на металоплівкові і металооксидні, композиційні та вуглецеві.

Для виготовлення металоплівкових і металооксидних резисторів застосовують тугоплавкі метали, а саме: титан, тантал, нікель, хром, реній, вольфрам і слави на їх основі.

*Металоплівкові резистори* мають такі властивості:

- 1) товщина резистивних плівок становить  $1 \div 10$  мкм;
- 2) високі значення питомого поверхневого опору  $\rho_s$ ;
- 3) низькі значення температурного коефіцієнта поверхневого електричного опору;
- 4) питомий об'ємний опір плівок залежить від товщини і є більшим, ніж у вихідних матеріалах;

В залежності від товщини плівок і умов їх нанесення параметри металоплівкових резисторів можна регулювати в широкому діапазоні. Для підвищення електричного опору плівок із титану та танталу їх наносять розпилюванням в середовищі азоту, кисню чи вуглецю, тобто поєднують процеси отримання провідних і діелектричних шарів у одному циклі з використанням одного і того ж матеріалу. При окисленні на поверхні металічних плівок утворюються оксиди титану і танталу, що мають досить високі ізоляційні властивості.

Плівкові резистори з ренію та вольфраму отримують методом катодного розпилювання і захищають тонким шаром оксиду кремнію для стабілізації електричного опору. Такі резистори характеризуються подібними властивостями що й танталові та титанові.

На рис.3.13 зображено взаємозв'язок між електричними параметрами резистивних плівок.

Як резистивні матеріали на основі металів застосовують композиційні металокремнієві сплави з високим електричним опором. Сплави марки РС містять кремній і леговані (зв'язуючі) елементи (залізо, хром, нікель). Їх випускають у вигляді сипучих порошків з розмірами частинок  $40 \div 70$  мкм і застосовують для отримання тонкоплівкових, в тому числі і прицевійних мікросхем. В позначенні марки сплаву (наприклад, РС 3001) букви і цифри означають: РС – резистивний сплав; перші дві

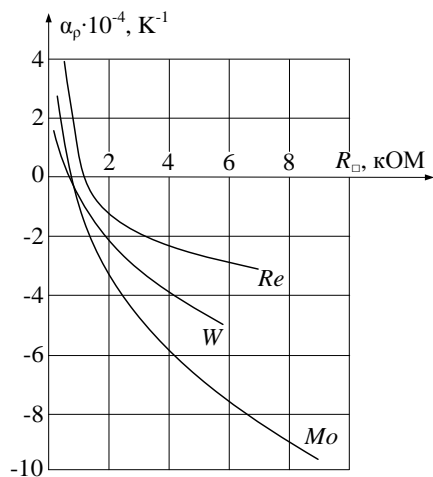


Рис.3.13. Залежність  $\alpha_p = f(R_{\square})$



цифри – процентний вміст основного компоненту – хрому (30%), що легує кремній; наступні дві цифри – вміст другого легуючого елемента – заліза (1%), інше (69%) – кремній.

Сплави марки МЛТ є багатокомпонентними і містять кремній, залізо, хром, нікель, алюміній, вольфрам та інші. Також випускають у вигляді дрібнозернистих порошків.

*Металооксидні матеріали* утворюють резистивні плівки, що характеризуються високою термостійкістю. Найбільше застосування отримали матеріали на основі оксиду олова  $SnO_2$ . Для їх нанесення використовують різні методи, зокрема, метод термічного розкладу хлористого олова. Отримані плівки відрізняються щільною дрібнозернистою структурою. Міцність з'єднання таких плівок з керамічною чи скляною основою набагато більша від міцності з'єднання металічних плівок і досягає 20 МПа.

За величиною температурного коефіцієнта лінійного розширення  $TK_l$  ( $\alpha_l$ ) металооксидні плівки близькі до  $TK_l$  скла і кераміки, що сприяє стійкості цих плівок при значних коливаннях температури. Ці плівки також хімічностійкі та стійкі до стирання, що дає змогу випускати на їх основі постійні і змінні резистори.

*Композиційні резистивні матеріали* є механічною сумішшю дрібнодисперсних порошків металів та їх з'єднань з органічним чи неорганічним зв'язуючим. Як провідну фазу використовують провідники (порошки срібла, паладію) і навіть напівпровідники (оксиди срібла, карбіди кремнію, вольфраму). Зв'язуючими речовинами є діелектрики – термопластичні або термореактивні (полімери, скло, неорганічні емалі).

Композиційні матеріали поєднують в собі ряд цінних властивостей: високий питомий опір, що практично не залежить від температури й можливість керування електричними властивостями змінною складу, порівняно проста технологія виготовлення.

Композиції, що містять органічні зв'язуючі речовини, легко піддаються дії вологи і підвищеної температури. Допустимі робочі температури не вищі 150 °С. В композиціях з неорганічними зв'язуючими речовинами після загартування при високих температурах досягаються високі вологостійкість і теплостійкість – аж до 150 °С, але верхня межа значень опорів резисторів зменшується.

Основним недоліками композиційних матеріалів є залежність опору від частоти та старіння при довготривалих електричних навантаженнях.

*Вуглецеві матеріали* – це провідні модифікації вуглецю: природний графіт, сажа, піролітичний вуглець. Резистивні властивості цих матеріалів сильно залежать від ступення їх подрібненості (дисперсності) і складають в середньому: температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_p = -(2 \div 10) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , питомий опір  $\rho = (8 \div 50) \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ . Від’ємне значення  $\alpha_p$  є характерною рисою вуглецевих матеріалів. Як зв’язуючі речовини застосовують лаки, термопластичні та терморективні смоли. Піролітичний вуглець отримують розкладом вуглеводнів при високих температурах у вакуумі чи середовищі інертних газів.

Вуглецеві резистивні плівки характеризуються такими властивостями: стійкість до імпульсних перевантажень, низький рівень власних шумів, від’ємний  $\alpha_p$ , незалежність електричного опору від прикладеної напруги і частоти, відносно низька собівартість.

### 3.10. Контактולי та припої

Крім рухомих контактів, у радіоелектронній апаратурі широко застосовуються і нерухомі контакти, основними з яких є припої, зварювання та з’єднання контактолами.

Паяння – спосіб з’єднання металевих або металізованих деталей з допомогою чистих металів чи спеціальних сплавів з метою створення механічно міцного і герметичного контакту з малим перехідним опором. Додатково при паянні використовують допоміжні речовини – флюси, що дають змогу захищати в процесі паяння поверхні від окислення.

**Припій** – матеріал, яким у розплавленому стані заповнюють проміжок між з’єднуваними частинами виробу, створюючи електричний контакт між ними. При паянні місця з’єднання і припій нагрівають. Температура плавлення у припою значно нижча від температури плавлення з’єднуваних деталей, що дає змогу розтікатись припою і заповнювати проміжок між ними. Припій дифундує в основний метал і поверхневий шар основного металу розчиняється в припої, утворюючи проміжний контактний шар. В результаті утворюється електричний контакт, що після затвердіння з’єднує деталі в одне ціле.

Припої поділяють на м’які з температурою плавлення  $T_{nl}$  до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  і границею міцності на розтяг  $\sigma_p = 16 \div 100 \text{ МПа}$  та тверді з температурою плавлення  $T_{nl}$  вище  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  і границею міцності на розтяг  $\sigma_p = 100 \div 500 \text{ МПа}$ . Різниця між паянням м’якими і твердими

припоями полягає в тому, що при паянні м'якими припоями переважає адгезія (поверхнєве зчеплення), яка здатна до змочування, а при паянні твердими припоями разом з адгезією – сплавлення і дифузія. З підвищенням температури швидкість взаємної дифузії і змочуваність зростають.

Найуживаніші м'які припої – олов'яно-свинцеві з вмістом олова від 18% (ПОС-18) до 90% (ПОС-90). Їх питома провідність становить близько 10% від питомої провідності міді, а температура плавлення – від 185 °С до 240 °С.

При нижчих температурах паяння застосовують легкоплавкі припої, що містять вісмут та кадмій. Номенклатура легкоплавких припоїв, що застосовують в електрорадіотехніці досить широка.

Основні властивості та області застосування м'яких і твердих припоїв наведені в таблиці 3.5.

Табл.3.5.

Марка припою	Хімічний склад, %	Температура плавлення $T_{пл}$ , °С	Область застосування
ПОС-90	$Sn - 90; Pb - 9,7; Sb - 0,3.$	222	Пайка деталей з гальванічними покриттями
ПОС-30	$Sn - 30; Pb - 68; Sb - 2$	256	Пайка міді, латуней, оцинкованого заліза
ПОС-61	$Sn - 61; Pb - 38,1; Sb - 0,8; Bi - 0,1.$	183	Пайка мікросхем, друкованих плат, деталей електроапаратури
ПОСК-47	$Sn - 49; Pb - 34, Cd - 17.$	145	Паяння металокераміки, покритих сріблом чи міддю
ПСрК	$Sn - 30; Pb - 6, Sb - 2; Ag - 2.$	230	Те ж
ПМЦ-36, ПМЦ-54	$Cu - 36\div 54; Zn - 46\div 64$	825÷860	Паяння міді та її сплавів, сталі
Від ПСр-25 до ПСр-70	$Cu - 26\div 40; Zn - 4\div 35; Ag - 25\div 70.$	720÷765	Паяння міді та її сплавів, срібла, платини, вольфраму, сталі
Сплав Вуда	$Sn - 12,5; Pb - 25; Cd - 11,5; Bi - 50.$	61	Паяння контактів при низьких температурах

Для отримання електричних контактів в радіоелектроніці застосовують струмопровідні пасти, клеї, емалі, що отримали назву контактоли. Вони представляють собою композиції на основі епоксидних та кремнійорганічних смол з додаванням порошків металів з високою теплопровідністю. Адгезійні властивості таких композицій визначаються зв'язуючою основою (смолою), а провідність досягається застосуванням наповнювачів (дрібнозернистих порошків металів). Швидкість полімеризації контактолів залежить від складу і кількості розчинника. Приготовлена суміш зберігається при температурі нижчій нуля в парах розчинника. Контактколи володіють наступними властивостями: висока міцність та еластичність, високі антикорозійні властивості, низька густина, питомий електричний опір у  $5 \div 100$  разів вищий, ніж у м'яких припоїв і лежить в межах  $\rho = 10^{-4} \div 6 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. В залежності від типу металічного наповнювача розрізняють контактоли, що містять срібло, нікель, паладій, золото, нікель та інші.

Контактоли на основі срібла – це пасти, що володіють такими властивостями: високий питомий опір  $\rho = 10^{-6} \div 6 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, висока стабільність властивостей при кліматичних і механічних впливах, адгезія до металів.

*Струмопровідний клей К-3* – пастоподібна рідина сірого кольору з питомим електричним опором  $\rho = 5 \cdot 10^{-4}$  Ом·м, витримує п'ять термоциклів при зміні температури від  $-60$  до  $120$  °С, характеризується адгезією до алюмінію, нікелю і золота. В структуру клею входять лак ПЕ-933 та порошок срібла в пропорції за масою 1:2. Його використовують для кріплення кристалів цифрових індикаторів до підложок і основ корпусів із забезпеченням електричного контакту.

*Струмопровідний клей АС-40В* – пастоподібна рідина сірого кольору з питомим електричним опором  $\rho = 10^{-4}$  Ом·м, що здатна витримувати десять термоциклів при зміні температури від  $-60$  до  $450$  °С, володіє адгезією до алюмінію та нікелю.

*Струмопровідний клей ЕВТ* – пастоподібна маса сірого кольору, що має такі властивості: питомий електричний опір  $\rho = 0,005$  мкОм·м, діапазон робочих температур  $t_{роб.} = (-60 \div 200)$  °С, проотягом часу 15 хв. може витримувати температуру до  $400$  °С, границя міцності при зсуві лежить в межах  $\sigma_z = (2,5 \div 4,5)$  Н/м<sup>2</sup>. Клей використовують замість пайки у виробництві напівпровідникових приладів і мікросхем.

## **Контрольні запитання**

1. Як змінюється питомий електричний опір металів з підвищенням температури? Що таке температурний коефіцієнт питомого опору металів?
2. Перерахуйте основні види провідників електричного струму.
3. Як можна класифікувати провідникові матеріали?
4. Назвіть основні електричні параметри провідників.
5. Запишіть формулу визначення опору провідників через його геометричні параметри і матеріал жили.
6. Як домішки впливають на питомий опір металів?
7. Що таке теплопровідність і теплоємність металів?
8. Перерахуйте основні сплави міді та сплави алюмінію.
9. Назвіть переваги й недоліки міді перед алюмінієм.
10. Охарактеризуйте вимоги, що висуваються до провідникових матеріалів.
11. Чому металічні сплави володіють більшим питомим опором, ніж окремі компоненти, що утворюють сплав?
12. Якими механічними властивостями володіють провідники?
13. Як пов'язані між собою електропровідність та теплопровідність металів?
14. Що таке контактна різниця потенціалів і при яких умовах можлива поява термоЕРС в замкнутому колі?
15. Які матеріали використовують для термопар?
16. Як розраховують температурний коефіцієнт лінійного розширення?
17. Поясніть поведінку провідників на високих частотах.
18. Наведіть приклади застосування сплавів високого опору.
19. Які матеріали відносять до неметалічних провідників?
20. Що таке контакти і яке їх призначення?
21. Запишіть формулу визначення опору провідника зі зміною його температури.
22. Які матеріали використовують як розривні контакти?
23. Як і чому залежить опір тонких металевих плівок від їх товщини?
24. Які метали і при яких умовах можуть переходити в стан надпровідності?
25. Які функції виконують тугоплавкі метали в напівпровідникових приладах?

## РОЗДІЛ 4. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

### 4.1. Загальні відомості та класифікація напівпровідників

За значеннями питомої електропровідності напівпровідники займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Їх питома електропровідність  $\gamma$  коливається від  $10^{-7}$  до  $10^6$  См/м або питомий опір  $\rho = 10^{-6} \div 10^7$  Ом·м. При зниженні температури їх питома провідність зменшується, а при  $T \rightarrow 0$  К напівпровідники зовсім не проводять електричний струм, тобто стають діелектриками. Зате при підвищенні температури питома провідність  $\gamma$  напівпровідників різко збільшується. Різний характер залежності провідності провідників і напівпровідників від температури, очевидно, можливий лише тому, що в провідниках поява вільних носіїв заряду викликається не зміною температури. Це викликано внутрішньою будовою провідника. Напівпровідникам для появи в них вільних носіїв заряду необхідно надати теплову енергію. Відповідно такі носії заряду називають тепловими.

На рис.4.1 приведено температурні залежності електропровідності для провідників і напівпровідників. Яким би іншим чином не була підведена додаткова енергія (наприклад: опромінення, механічне навантаження, електричне поле і т.д.) в напівпровідниках з'являться додаткові носії заряду, що називаються нерівноважними, і провідність напівпровідника на відміну від металів може суттєво змінюватись.

Значний вплив на провідність справляє внутрішня структура напівпровідників. Крім цього, введення в напівпровідник навіть невеликої кількості атомів стороннього хімічного елемента різко змінює його електропровідність. Все це відкриває широкі можливості для керування електрофізичними властивостями напівпровідників.

До класу напівпровідників входять сотні різноманітних речовин. Напівпровідникові властивості мають як неорганічні, так і органічні речовини, кристалічні та аморфні, тверді й рідкі, магнітні та немагнітні. Класифікацію матеріалів зображено на рис.4.2.

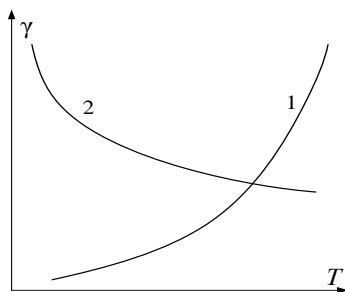


Рис.4.1. Графіки залежності питомої провідності напівпровідників (1) і металів (2) від температури

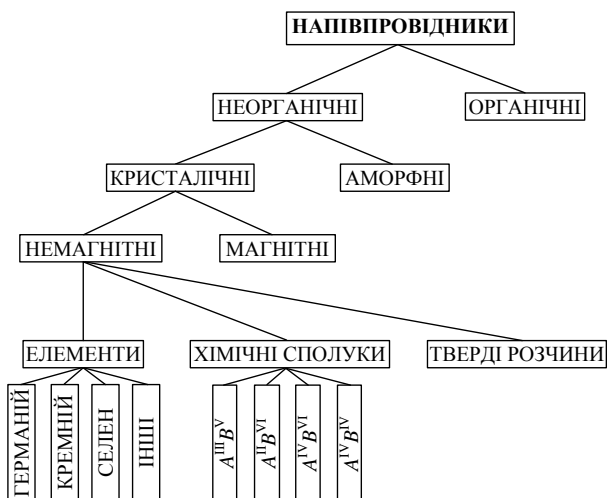


Рис.4.2. Класифікація напівпровідників за їх властивостями

Отже, напівпровідник – це речовина, основною властивістю якої є сильна залежність її електропровідності від дії зовнішніх факторів. Всі напівпровідники можна розділити на прості та складні.

Простим називають такий напівпровідник, який складається з атомів одного хімічного елемента. До простих належать кремній, германій, селен, телур, бор, вуглець, фосфор, сірка, миш'як, сурма, йод та інші.

Структура складних напівпровідників утворена атомами різних хімічних елементів. До цієї групи відносять тверді розчини (наприклад, кремнію і германію) і хімічні з'єднання, що позначаються  $A_x^m B_y^n$ . В цій формулі індекси  $m$  і  $n$  означають номер групи періодичної системи, в яку входить відповідний елемент, а нижні  $x$  і  $y$  – число атомів цього елемента в з'єднанні. Серед бінарних з'єднань практичне застосування одержали з'єднання  $A^{IV}B^{IV}$ ,  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ .

Напівпровідникові з'єднання  $A^{III}B^V$  утворюються в результаті взаємодії елементів III-ї підгрупи періодичної таблиці (бору, алюмінію, галію, індію) з елементами V-ї підгрупи (азотом, фосфором, миш'яком, сурмою). З'єднання типу  $A^{III}B^V$  прийнято класифікувати за металоїдним елементом. Відповідно розрізняють нітриди, фосфіди, арсеніди й антимоніди. Одержують ці з'єднання або з розплаву, що містить елементи в рівних атомних концентраціях, або з розчину з'єднання, що має в надлишку елементи III групи, а також з газової фази.

Кристали антимонідів, арсенідів галію, індію, як правило, вирошують з розплаву в атмосфері інертного газу. Шар рідкого флюсу, що перебуває під тиском інертного газу, забезпечує повну герметизацію тигля й придушує випар летучих компонентів з розплаву. Однак монокристали, отримані з розплаву, мають недостатньо високу хімічну чистоту й потребують додаткового очищення.

Особливе становище серед з'єднань  $A^{III}B^V$  займає арсенід галію. Більша ширина забороненої зони, висока рухливість електронів дають змогу створювати на його основі прилади, які працюють на високих частотах і за високих температур. Він використовується для виготовлення світлодіодів, тунельних діодів, діодів Ганна, сонячних батарей і т.д.

До напівпровідникових з'єднань  $A^{II}B^{VI}$  відносять халькогеніди цинку, кадмію, ртуті. Широкозонні напівпровідники  $A^{II}B^{VI}$  мають високу температуру плавлення й високий тиск дисоціації в точці плавлення. Застосовують для виготовлення люмінофорів, фоторезисторів, давачів Холла, приймачів інфрачервоного випромінювання.

Напівпровідники використовують для підсилення і генерації електричних сигналів (транзистори, діоди, інтегральні мікросхеми), в якості первинних перетворювачів температури і джерел теплової енергії (терморезистори і нагріваючі елементи), сигналів (фоторезистори, світлодіоди, лазери), для перетворення механічних коливань (тензорезистори, п'єзодавачі) і т.д.

Виготовлені з напівпровідникових матеріалів радіотехнічні пристрої володіють перевагами, серед яких: 1) великий строк служби; 2) малі габарити й маса; 3) простота і надійність конструкції; 4) споживана мала потужність; 5) економічність при масовому виробництві.

## 4.2. Власна провідність напівпровідників

Власний напівпровідник – це напівпровідник, що не містить домішок, які впливають на його електропровідність. Розглянемо елементи IV групи періодичної системи: вуглець, кремній, германій. Ці елементи мають на зовнішній електронній оболонці по чотири електрони. Всі вони при кристалізації утворюють алмазоподібну модифікацію кубічної решітки, в якій кожний атом, що розміщений у вузлі кристалічної ґратки, обмежений чотирма іншими і зв'язаний з ними ковалентними зв'язками. При цьому кожний зовнішній електрон належить двом атомам, в результаті чого зовнішні



оболонки атомів добудовуються до восьми електронів. Тепер зрозуміло, чому при  $T \rightarrow 0$  К провідність напівпровідника прямує до нуля. Це є наслідком того, що всі електрони беруть участь в утворенні ковалентних зв'язків, і вільні носії заряду, що утворюють провідність, відсутні.

Для того, щоб у напівпровідника з'явились вільні носії заряду потрібно розірвати ковалентний зв'язок, тобто надати електрону додаткову енергію активації  $\Delta W$ , що дорівнює енергії розриву ковалентного зв'язку. Електрон, що звільнився за рахунок теплової енергії, хаотично рухається по об'єму напівпровідника.

При дії на напівпровідник електричного поля електрон, володіючи від'ємним зарядом, буде переміщатись в напрямі, що протилежний до напрямку зовнішнього поля. На місці відірваного електрона залишається позитивно заряджений незаповнений зв'язок із зарядом, що дорівнює заряду електрона і отримав назву дірки провідності. Дірку може зайняти електрон сусіднього атома, причому для цього не знадобиться розривати ще один зв'язок. Це еквівалентно тому, що дірка переміститься в зворотньому напрямі, тобто в напрямі поля.

На рис.4.3 показано схематичне пояснення власної електропровідності для кремнію.

Таким чином, розрив одного ковалентного зв'язку призводить до появи в напівпровідника відразу двох вільних носіїв заряду: від'ємно зарядженого електрона провідності і позитивно зарядженої дірки провідності. Концентрація вільних електронів  $n$  в одиниці об'єму дорівнює концентрації дірок  $p$ .

Отже, напівпровідники, в яких провідність виникає за рахунок розриву власних ковалентних зв'язків, називають власними.

Таким чином, власна електропровідність напівпровідника  $\gamma$  складається з електронної електропровідності  $\gamma_n$  і діркової  $\gamma_p$ .

Строге пояснення електропровідності дає зонна теорія. На рис.4.4 енергетичні рівні зв'язаних електронів, розчеплюючись при

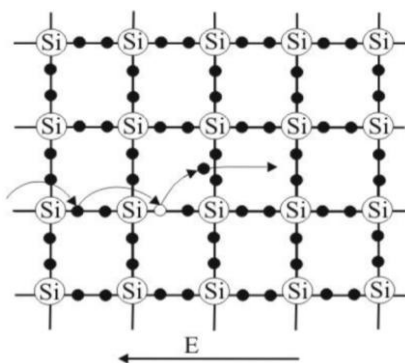


Рис.4.3. Схематичне пояснення власної електропровідності

зближенні атомів, утворюють зону енергій – валентну зону. Енергетичні рівні, які можуть зайняти вільні електрони, утворюють зону провідності. При  $T \rightarrow 0$  К вільних електронів немає, всі рівні валентної зони заповнені електронами, а рівні зони провідності вільні. Ці зони розділені між собою забороненою зоною, в якій немає дозволених енергетичних рівнів. Для напівпровідників ширина забороненої зони  $\Delta W$  коливається від 0,1 до 3 eV.

Щоб перевести електрон з верхнього рівня валентної зони  $W_V$  на нижній рівень зони провідності  $W_C$ , йому треба надати енергію активації. При цьому у валентній зоні залишається вільний рівень – позитивно заряджена дірка. В результаті у напівпровідника виникає два носії заряду: електрон в зоні провідності і дірка у валентній зоні.

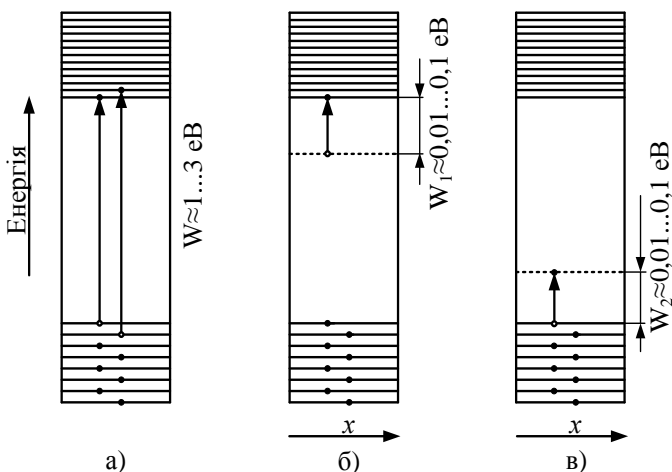


Рис.4.4. Вплив домішок на енергетичну діаграму напівпровідників:  
 а) власний напівпровідник; б) напівпровідник з донорною домішкою ( $n$ -тип); в) напівпровідник з акцепторною домішкою ( $p$ -тип)

Концентрація електронів  $n$  у напівпровідників на відміну від металів значно нижча концентрації атомів. Наприклад, у кремнію власна концентрація носіїв заряду становить  $3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$  при концентрації атомів  $5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

Тому за рахунок зовнішньої енергії концентрацію носіїв заряду в напівпровідникові можна збільшити на декілька порядків. Відповідно на стільки ж порядків зростає електропровідність.

### 4.3. Домішкова провідність напівпровідників

Лише ідеальні напівпровідникові кристали проводять електричний струм за рахунок власної електропровідності. В реальних, тобто тих, що використовуються на практиці, напівпровідникових матеріалах переважає домішкова електропровідність, якою набагато легше керувати. Причиною виникнення домішкової електропровідності є неідеальність кристалічної структури напівпровідника, наявність дефектів у його кристалічній ґратці. Дефекти кристалічної решітки викликають появу додаткових енергетичних рівнів, що лежать всередині забороненої зони. Тому енергія, необхідна для переходу електрона з додаткового рівня в зону провідності або з валентної зони на додатковий рівень, є доволі менша ширини забороненої зони  $\Delta W$ . В тому і в іншому випадку з'являється додатковий носій заряду, але тільки один: в першому випадку – електрон провідності, у другому – дірка провідності.

Домішки, що викликають у напівпровідникові збільшення вільних електронів називаються донорними, а ті що викликають збільшення дірок – акцепторними. Відповідно напівпровідники з переважанням електронної електропровідності називають електронними ( $n$ -типу), а напівпровідники з переважанням діркової електропровідності – дірковими ( $p$ -типу).

Розглянемо найбільш важливий у практичному плані тип дефектів кристалічної структури – наявність атомів домішки, що показано на рис. 4.5. Нехай атом кремнію в кристалічній ґратці заміщений атомом елемента з валентністю, що відрізняється на одиницю, наприклад, миш'яком. Чотири з п'яти валентних електронів миш'яку будуть брати участь в утворенні ковалентних зв'язків з сусідніми атомами кремнію, а п'ятий електрон буде зв'язаний тільки з позитивним іоном миш'яку.

Енергія такого зв'язку набагато менша енергії ковалентного зв'язку, тобто енергія іонізації домішки  $W_0$ , що необхідна для від-

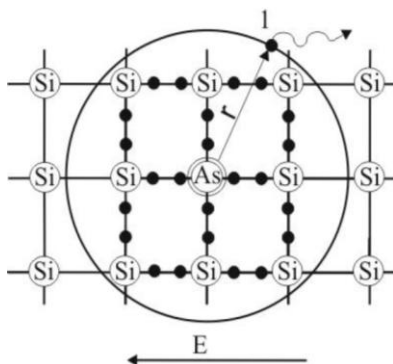


Рис.4.5. Схематичне пояснення донорної домішки в напівпровідника (1 – надлишковий електрон домішкового атома миш'яку)

риву цього електрона, набагато менша ширини забороненої зони  $\Delta W$ . Отже, достатньо малої додаткової енергії, щоб цей п'ятий електрон відірвати від атома миш'яку і перевести його в електрон провідності. На місці відіраного електрона утворюється дірка, але так як атоми миш'яку через їх малу концентрацію розміщені далеко один від одного, електрони інших атомів не можуть заповнити її. В результаті дірка залишається нерухомою і діркова електропровідність відсутня. Тут електропровідність буде носити електронний характер.

Тепер розглянемо випадок заміщення атомів кремнію атомами трьохвалентного елемента – бору, що показано на рис.4.6.

Всі три валентних електрони беруть участь в утворенні ковалентних зв'язків з атомами кремнію, але один зв'язок залишається незаповненим. Цей зв'язок може заповнити електрон сусіднього атома кремнію, причому для цього буде потрібна мала в порівнянні з  $\Delta W$  енергія іонізації  $W_a$  (для бору в кремнії  $W_a = 0,046$  eV). Приймавши додатковий електрон, атом бору іонізується і стає від'ємним іоном, а атом кремнію, що віддав електрон – додатнім іоном. Будучи зв'язаними кристалічною ґраткою, іони є нерухомими.

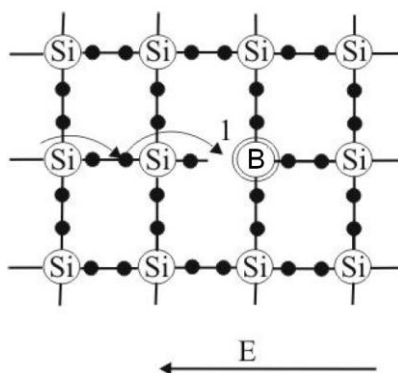


Рис.4.6. Схематичне пояснення доноїрної домішки в напівпровіднику (1 – надлишковий електрон домішкового атома миш'яку)

Носієм заряду є тільки незаповнений зв'язок – дірка, і електропровідність напівпровідника носить дірковий характер.

Таким чином, введення домішок призводить до появи в напівпровідникові домішкової електропровідності за рахунок іонізації атомів домішки. Можливість керування величиною і типом електропровідності напівпровідників шляхом введення домішок лежить в основі практично всіх напівпровідникових пристроїв.

У практиці напівпровідників часто стикаються із визначенням його типу електропровідності. Тут використовують ефект Холла.

Якщо пластинку напівпровідника помістити в магнітне поле, що утворює в ній магнітну індукцію  $B$ , а в перпендикулярному на-

прямі пропустити електричний струм з густиною  $J$ , то в напівпровіднику виникне поперечне електричне поле, що є перпендикулярним до струму і напрямку магнітного поля. Появу цього поля проілюстровано на рис.4.7 для напівпровідника  $n$ -типу.

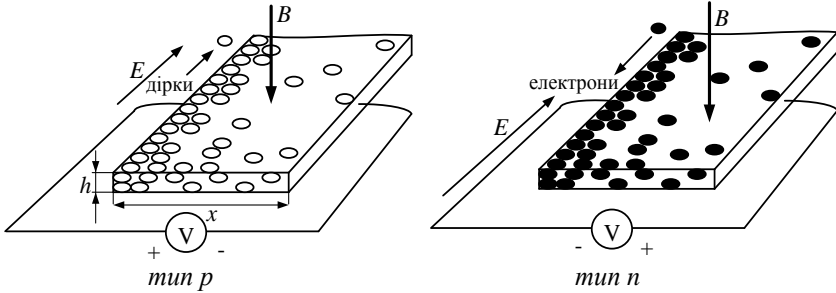


Рис.4.7. Визначення типу електропровідності напівпровідника з використанням ефекту Холла

На рухомий в магнітному полі електрон діє сила, напрям якої визначають за правилом лівої руки. Величина цієї сили залежить від індукції  $B$  і швидкості руху електрона  $V$ :  $F = e \cdot V \cdot B$ .

Під дією сили  $F$  електрони переміщуються до верхньої границі пластини, і в напівпровідникові виникає електричне поле з напруженістю  $E_x$ , що напрямлене знизу вверх і діє на електрони в зворотньому напрямі з силою  $-eE_x$ . Рівновага встановиться в тому випадку, якщо обидві сили, що діють на електрони, будуть однакові:

$$e \cdot V \cdot B = -eE_x, \quad (4.1)$$

де  $V$  – дрейфова швидкість електрона

$$V = \frac{J}{n \cdot e}, \quad (4.2)$$

$n$ ,  $e$  – концентрація та заряд електронів.

Тоді

$$E_x = \frac{JB}{ne} = RJB, \quad (4.3)$$

де  $R = -1/ne$  – коефіцієнт Холла.

Якщо напівпровідник володіє дірковою електропровідністю, то  $R = 1/pe$ , а напрям електричного поля змінюється на протилеж-

ний. При товщині пластинки  $x$  на її кінцях з'явиться різниця потенціалів Холла [5]:

$$\boxed{\times} \quad (4.4)$$

Таким чином, визначивши напрям ЕРС Холла, можна визначити і тип електропровідності напівпровідника. Ефект Холла широко застосовують на практиці для вимірювання параметрів електромагнітних полів. Використовувані з цією метою напівпровідникові матеріали повинні володіти високою рухливістю носіїв заряду в поєднанні з низькою електропровідністю. Такі властивості мають з'єднання індію  $InAs$  та  $InSb$ .

#### 4.4. Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідників

На провідність напівпровідника впливають зовнішні фактори, такі як температура, електричне поле, деформації та інші.

**Вплив температури** на питому електропровідність  $\gamma$  напівпровідника.

З формули [5]

$$\gamma = e n \mu_n + e p \mu_p \quad (4.5)$$

видно, що питома електропровідність напівпровідника залежить в основному від концентрації електронів і дірок. Тут  $e$  – модуль заряду електрона;  $\mu_n$  і  $\mu_p$  – відповідно рухливість електронів і дірок;  $n$ ,  $p$  – концентрація електронів і дірок.

При  $T \rightarrow 0$  К всі електрони зв'язані з атомами, в зоні провідності електронів немає і електропровідність  $\gamma = 0$ . Якщо за рахунок зовнішньої енергії підвищити температуру напівпровідника, то деякі електрони почнуть переходити в зону провідності. Насамперед це стосується слабо зв'язаних електронів атомів домішок, яким для переходу в зону провідності необхідна енергія  $W_0$ , набагато менша, ніж енергія активації власних електронів. Тому зі збільшенням температури концентрація носіїв заряду і провідність  $\gamma$  будуть зростати за експоненціальним законом

$$\gamma = \gamma_{0дом} \cdot e^{-\frac{W}{2kT}}, \quad (4.6)$$

де  $\gamma_{0дом}$  – постійний коефіцієнт.

Для зручності зображення прийнято будувати графік залежності не  $\gamma = \varphi(T)$ , а  $\ln \gamma = \varphi(1/T)$ . Прологарифмувавши цей вираз отримаємо:

$$\ln \gamma = \ln \gamma_{000m} - \frac{W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4.7)$$

З виразу (4.7) видно, що величина  $\ln \gamma$  лінійно зростає при зменшенні  $1/T$ , тобто при підвищенні температури. Цьому виразу відповідає ділянка 1-2 на рис.4.8. На рис.4.9 показано температурну залежність власної концентрації носіїв заряду в кремнії та германії.

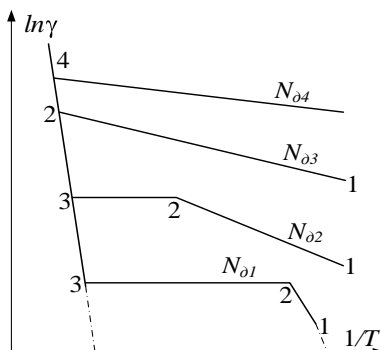


Рис.4.8. Теоретична залежність  $\ln \gamma = f(1/T)$  напівпровідника при різних концентраціях домішок:

$$N_{d4} > N_{d3} > N_{d2} > N_{d1}$$

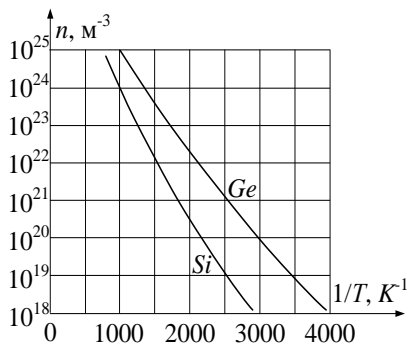


Рис.4.9. Температурна залежність власної концентрації носіїв заряду в кремнії та германії

При подальшому підвищенні температури всі валентні електрони домішки перейдуть у зону провідності, після чого провідність перестане збільшуватись (ділянка 2-3).

Провідність буде залишатися постійною до тих пір, поки температура збільшиться настільки, що енергія власних електронів перевищить ширину забороненої зони. Концентрація носіїв заряду почне різко зростати за рахунок власних електронів, що переходять у зону провідності (ділянка 3-4).

У зв'язку з тим, що концентрація власних атомів на декілька порядків вища за концентрацію атомів домішок, значення власної електропровідності буде суттєво більшим за значення домішкової, і вплив останньої в сумарну електропровідність буде незначним. Зміну провідності на ділянці 3-4 можна описати виразом:

$$\gamma = \gamma_{\text{власн}} \cdot e^{-\frac{W}{2kT}}. \quad (4.8)$$

Нахил на ділянці 1-2 визначається величиною  $-\frac{W}{2kT}$ , а на ділянці 3-4 – величиною  $-\frac{W}{2k}$ . На рис.4.8 показано декілька залежностей, що відповідають різній концентрації атомів домішки. Очевидно, що при збільшенні концентрації величина  $\gamma_{\text{дом}}$  збільшується. Одночасно за рахунок посилення взаємодії між домішковими атомами зменшується енергія іонізації домішок, а відповідно, зменшується й нахил ліній графіка на ділянці 1-2. За досить високої концентрації домішок ( $N_{\text{дд}}$ ) домішковий рівень, розширюючись у зону, зливається з зоною провідності, тобто  $W_{\text{д}} = 0$ .

Відповідно, уже за низьких температур всі валентні електрони домішок є електронами провідності, і концентрація домішкових носіїв заряду не залежить від температури. При високих температурах напівпровідники за величиною провідності наближаються до провідників.

**Вплив електричного поля.** При відсутності зовнішнього електричного поля, носії заряду, що містяться в напівпровідникові, при даній температурі рухаються хаотично. Тому середня швидкість їх руху дорівнює нулю. Якщо прикласти зовнішнє електричне поле з напруженістю  $E$ , то на хаотичний рух носіїв заряду накладається напрямлений рух, тобто в напівпровіднику виникає струм.

На рис.4.10 зображено залежність провідності напівпровідника від напруженості зовнішнього електричного поля.

Якщо провідність  $\gamma$  постійна, то зі зростанням напруженості густина струму буде лінійно зростати доти, поки напруженість поля не перевищить деякого критичного значення  $E_{\text{кр}}$ . При подальшому збільшенні  $E$  провідність збільшується, що пояснюється в основному зростанням концентрації ( $n, p$ ) і рухливості ( $\mu_n, \mu_p$ ) носіїв заряду.

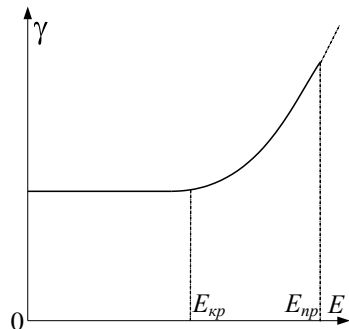


Рис.4.10. Залежність  $\gamma = f(E)$  для напівпровідника



Вільний електрон, пройшовши в напівпровідникові під дією зовнішнього електричного поля відстань  $l$ , збільшує свою енергію на величину  $eEl$ .

При  $E > E_{кр}$  цієї енергії достатньо для того, щоб зіткнення електрона з атомом призвело до іонізації останніх, причому сам електрон залишився би в зоні провідності. Додаткові носії заряду, що з'явилися в результаті іонізації, прискорюються полем і генерують нові вільні носії. Цей процес називають ударною іонізацією.

При збільшенні  $E$  до деякої величини  $E_{np}$  процес зростання концентрації зарядів буде частково компенсуватись процесом рекомбінації. При  $E > E_{np}$  концентрація носіїв заряду і густина струму збільшуються, виділяється велика кількість теплоти і відбувається пробій, тобто незворотне руйнування напівпровідника.

**Вплив освітленості.** Під впливом падаючого на напівпровідник світла електрони одержують додаткову енергію. При цьому величина енергії, яка передається кожному електрону, залежить від частоти світлових коливань і не залежить від сили світла джерела випромінювання. Зі збільшенням сили світла джерела випромінювання збільшується число електронів, які поглинають енергію. Енергія фотона визначається виразом [5]

$$E_{\phi} = h\nu, \quad (4.9)$$

де  $h$  – постійна Планка;  $\nu$  – частота світлових коливань, яка має бути близькою до  $W$ .

Фотопровідність напівпровідника визначається як різниця питомої електропровідності при освітленні й у темряві:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{CB} - \sigma_T. \quad (4.10)$$

Темнова електропровідність для електронної електропровідності визначається за формулою

$$\sigma_T = q \cdot n \cdot \mu_n. \quad (4.11)$$

Електропровідність, що виникає в напівпровіднику при впливі на нього світлового випромінювання, запишемо у вигляді

$$\sigma_{CB} = q\mu_n(n + \Delta n), \quad (4.12)$$

де  $\Delta n$  – додаткове число електронів, які утворилися в напівпровідникові внаслідок його освітлення.

Таким чином, фотопровідність буде дорівнювати

$$\sigma_{\phi} = q \cdot \Delta n \cdot \mu_n. \quad (4.13)$$

Електрони, які з'явилися під впливом випромінювання, перебувають у зоні провідності короткий час ( $10^{-3} \div 10^{-7}$  с). При відсутності зовнішнього електричного поля вони хаотично переміщуються в міжатомних проміжках. Під впливом поля ці електрони беруть участь в електропровідності.

При завершенні освітлення напівпровідника електрони переходять на більш низькі домішкові енергетичні рівні або у валентну зону. Безперервне освітлення супроводжується встановленням динамічної рівноваги між процесами утворення додаткових носіїв заряду і їхньої рекомбінації. Зі зменшенням температури фотопровідність збільшується у зв'язку зі зменшенням концентрації теплових носіїв заряду й зменшенням імовірності рекомбінації носіїв заряду напівпровідника, що утворюються в результаті освітлення.

**Вплив деформації.** Електропровідність твердого кристалічного тіла змінюється при впливі на нього різного виду деформацій у зв'язку зі зміною міжатомних відстаней і зміною концентрації та рухливості носіїв заряду.

Концентрація змінюється внаслідок зміни ширини енергетичних зон напівпровідника й зсуву домішкових рівнів, що призводить, у свою чергу, до зміни енергії активації носіїв заряду й, отже, до зменшення або збільшення концентрації.

Рухливість змінюється через збільшення або зменшення амплітуди коливань атомів при їхньому зближенні або віддаленні.

Величиною, що чисельно характеризує зміну питомої провідності напівпровідника при деформації, є тензочутливість

$$d_p = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}, \quad (4.14)$$

що представляє собою відношення відносної зміни питомого опору до відносної деформації в даному напрямку.

## 4.5. Прості напівпровідники

Напівпровідникові властивості проявляють кристали багатьох хімічних елементів, зокрема III, IV, V, VI, VII груп періодичної системи Д.І. Менделєєва. Також напівпровідникові властивості проявляє одна з алотропних модифікацій вуглецю – алмаз. В су-

часній електронній техніці застосовують чотири елементарних напівпровідники.

**Кремній** – основний матеріал сучасного напівпровідникового виробництва. Для виготовлення дискретних напівпровідникових пристроїв він широко застосовується разом з іншими матеріалами, зокрема, для виробництва діодів, транзисторів, фотоелементів, тензоперетворювачів, інтегральних мікросхем. Технічний кремній отримують в електричних печах відновленням його оксидів вуглецевмісними речовинами.

Кремній є одним з найпоширеніших матеріалів у земній корі (близько 29%). Але у вільному стані в природі він не зустрічається, а є присутнім тільки в з'єднаннях у вигляді оксидів і у солях кремнієвих кислот. Технічний кремній, який одержують шляхом відновлення природного діоксиду  $SiO_2$  в електричній дузі між графітовими електродами, містить близько 1% домішок і як напівпровідник використовуватися не може. Він є вихідною сировиною для одержання кремнію ідеальної чистоти, в якому вміст домішок не повинен перевищувати  $10^{-6}\%$ .

Об'ємні кристали кремнію одержують шляхом вирощування з розплаву при вертикальній зонній плавці. Перший метод застосовують для одержання великих монокристалів з відносно невеликим питомим опором ( $\rho < 2,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Другий метод використовують для одержання високоомних монокристалів кремнію з малим вмістом залишкових домішок. Кристали кремнію *n*- і *p*-типу одержують шляхом введення при вирощуванні відповідних домішок, серед яких найчастіше використовують фосфор і бор.

Питомий опір кремнію змінюється в широких межах залежно від концентрації в ньому домішок. Завдяки більш широкій забороненій зоні власний питомий опір кремнію більш ніж на три порядки перевершує власний питомий опір германію. Під час плавлення кремнію дещо збільшується його густина (на 8%) і стрибкоподібно зменшується питомий опір (в 30 разів). У розплавленому стані кремній має питомий опір порядку  $10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  і має такі ж властивості, що й рідкі метали.

**Германій** має металевий блиск і характеризується високою твердістю та крихкістю. Температура його плавлення становить  $t_{пл} = 937 \text{ }^\circ\text{C}$ , густина за температури  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  складає  $D = 5,33 \text{ г/см}^3$ . У твердому стані германій є типовим ковалентним кристалом. Кристалічний германій хімічно стійкий на повітрі при кімнатній темпе-

ратурі. Роздрібнений у порошок під час нагрівання на повітрі до температури  $\approx 700$  °C він легко утворює діоксид германію  $GeO_2$ . Германій слабо розчинний у воді й практично нерозчинний у соляній і розведеній сірчаній кислотах. Активним розчинником германію в нормальних умовах є суміш азотної кислоти і розчину перекису водню. При нагріванні германій інтенсивно взаємодіє з галогенами, сіркою і сірчаноокислими з'єднаннями.

Германій, який застосовується у напівпровідникових приладах та електроніці, має питомий опір від мільйонних часток Ом·м до значень, близьких до питомого опору власного германію. На електричні властивості германію сильно впливає режим термообробки. Якщо зразок германію *n*-типу нагріти до температури приблизно 550 °C, а потім різко охолодити, то відбудеться зміна типу електропровідності.

Аналогічна термообробка германію *p*-типу призводить до зменшення питомого опору без зміни типу електропровідності. Відпалювання загартованих зразків за температури 500–550 °C відновлює не тільки тип електропровідності, але й первісний питомий опір. При розплавленні германію його питомий опір стає близьким до питомого опору рідких металів.

В результаті хімічної переробки вихідної сировини утворюється тетрахлорид германію, який шляхом подальших операцій переводять у діоксид германію ( $GeO_2$ ) – порошок білого кольору. Його піддають травленню в суміші кислот і сплавляють в зливки. Питомий опір германію залежить від концентрації носіїв, що визначається ступенем очистки. Для отримання монокристалу за методом витягування з розплаву ретельно очищений від домішок германій розплавляють у спеціальних установках.

Щоб отримати монокристали строго постійного діаметра по всій довжині, необхідно температуру розплаву підтримувати постійною з точністю до десятих долей градуса. Цим способом отримують монокристали германію діаметром в десятки міліметрів. Зливки мають неоднаковий опір по довжині, позаяк їх верхня частина містить менше число домішок, ніж нижня, що витягується із залишків розплавленого германію з підвищеною концентрацією домішок.

При витягуванні монокристалу в нього вводять в строго контрольованій кількості домішок для отримання германію з визначеною величиною і типом електропровідності.

Застосовують германій для виготовлення діодів, давачів Холла, тензодавачів, фотодіодів, модуляторів світла тощо.

**Селен** – зустрічається в декількох алотропних модифікаціях, зокрема в гексагональній, а також в аморфному вигляді. Технічний селен містить 1÷2,5% домішок, проявляє діркову (*p*-тип) електропровідність ( $\gamma = 10^{-3}$  См/м).

Температурний діапазон роботи селенових випрямлячів лежить в межах від  $-60$  °С до  $+75$  °С, за своїми властивостями такі випрямлячі поступаються германієвим та кремнієвим. Тобто сучасне застосування селену є досить обмеженим. Безпосередньо для напівпровідникового виробництва не придатний.

Основні властивості кремнію, германію та селену приведені в таблиці 4.1.

Табл.4.1.

Властивості	Германій	Кремній	Селен
Густина, г/см <sup>3</sup>	5,3	2,3	4,8
$TK_{сер.}, K^{-1}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
Теплопровідність $\gamma_T$ , Вт/м·К	55	80	4
Теплоємність $C$ , Дж/кг·К	333	710	330
$T_{пл},$ °С	936	1414	220
Питомий опір $\rho$ , Ом·м	0,47	2000	–
Концентрація основних носіїв $n$ , м <sup>-3</sup>	$2,5 \cdot 10^{19}$	$10^{16}$	–
Ширина забороненої зони $\Delta W$ , еВ	0,72	1,12	1,8
Робота виходу електронів, еВ	4,8	4,3	2,85
Діелектрична проникність $\epsilon$	16	12,5	6,3

**Алмаз** – широкозонний напівпровідник, що забезпечує гладке (без пульсацій) випрямлення струму у діодах та суттєве підсилення сигналів у транзисторах. Характеризується високою допустимою температурою (до  $1600$  °С). Але висока вартість і затруднена обробка напівпровідникового алмазу дещо обмежує його використання в електронних пристроях.

Основна перевага алмазу – найвища теплопровідність з усіх твердих речовин, що дає змогу виготовляти з нього потужні діоди з покращеними умовами тепловідводу, що працюють на високих частотах.

## 4.6. Бінарні з'єднання

### 4.6.1. Напівпровідникові з'єднання типу $A^{IV}B^{IV}$

Прості напівпровідники в багатьох випадках не можуть задовільняти вимоги сучасної електроніки. Для розширення властивостей напівпровідників широко використовують складні неорганічні та органічні напівпровідникові з'єднання. Найбільше використання знайшли неорганічні кристалічні напівпровідники [7].

*Карбід кремнію SiC* – єдине бінарне з'єднання елементів IV групи таблиці Д.І. Менделєєва і в природі зустрічається дуже рідко. Полікристалічний карбід кремнію отримують в електричних печах відновленням двооксиду кремнію вуглецем згідно з рівнянням [13]



Карбід кремнію може мати дві модифікації – кубічну  $\beta$ -SiC та гексагональну  $\alpha$ -SiC, що має ширше застосування у напівпровідниковому виробництві. Низькотемпературна кубічна модифікація з густиною  $D = 3,1 \text{ г/см}^3$  стійка до температур, близьких до  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Високотемпературна модифікація з густиною  $D = 3,2 \text{ г/см}^3$  стійка до температур, близьких  $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ , і отримується методом сублімації (переходом речовини з твердого стану у газоподібний, обминаючи при цьому рідкий стан), при якому кристали вирощують з газоподібною фази в графітових тиглях в атмосфері інертного газу. В результаті отримують монокристали обох типів електропровідності.

До складу карбіду кремнію входять 70% кремнію і 30% вуглецю. При цьому таку сполуку вважають власним напівпровідником, де надлишок кремнію призводить до переважання електронної електропровідності, а надлишок вуглецю до діркової

З іншого боку, для отримання карбіду кремнію з електронною електропровідністю до його складу можна ввести леговані домішки – елементи V групи періодичної системи, зокрема азот, фосфор, сурму, вісмут, миш'як. Кристали карбіду кремнію з дірковою електропровідністю отримуються при легуванні елементами II та III груп (бор, галій, алюміній, індій, кальцій, магній).

Для різних типів  $\alpha$ -модифікацій карбіду кремнію ширина забороненої зони є значною і становить  $\Delta W = 2,72 \div 3,34 \text{ eV}$ , що дає змогу створювати напівпровідникові пристрої з робочими температурами до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  для контролю високотемпературних процесів у доменних печах.

Власна електропровідність карбіду кремнію спостерігається при температурах вищих 1400 °С. Рухливість носіїв заряду є низькою і не перевищує  $\mu_n = 0,1 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  для електронів та  $\mu_p = 0,02 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  для дірок.

Завдяки високій енергії зв'язку атомів вуглецю і кремнію він володіє міцністю, що близька до міцності алмазу, а також хімічно стійкий.

Дифузію домішок в карбід кремнію проводять закритим способом при температурах 1800÷2200 °С. Таким чином отримуються інжекційні світлодіоди, максимум випромінювання яких знаходиться в різних частинах видимої області спектра. Також карбід кремнію має здатність до люмінесценції у видимій частині спектра, тобто спонтанного світлового випромінювання. Таке явище широко використовують в електроніці та медицині.

Порошкоподібний карбід кремнію широко застосовують при виготовленні високотемпературних нагрівачів, варисторів, випрямних та тунельних діодів.

#### 4.6.2. Напівпровідникові з'єднання типу $A^{III}B^V$

Усі напівпровідникові з'єднання типу  $A^{III}B^V$  мають структуру сфалериту – сульфиду цинку. Сюди відносять елементи третьої і п'ятої груп періодичної системи, а саме: галій, індій, бор, алюміній та фосфор, сурма, миш'як, азот. Така структура аналогічна кристалічним ґраткам кремнію і германію, в яких кожен атом зв'язаний з чотирма іншими атомами ковалентними зв'язками. Різниця полягає в тому, що у вузлах кристалічної ґратки таких з'єднань знаходяться не нейтральні атоми, а по чергово розміщені додатньо заряджені іони  $B^V$  і від'ємно заряджені іони  $A^{III}$ .

Температура плавлення з'єднань  $A^{III}B^V$  вища за температуру плавлення вихідних елементів за винятком антимоніду індію. Ширина забороненої зони лежить у широких межах  $\Delta W = 0,18\div 2,45 \text{ еВ}$ . Нижня межа стосується антимонідів індію, алюмінію, галію (*InSb*, *AlSb*, *GaSb*), а верхня – фосфідів цих елементів.

Висока рухливість електронів дає змогу отримувати на основі таких з'єднань високочастотні напівпровідникові прилади.

У широкому діапазоні довжин хвиль, включаючи видиму та інфрачервону області спектра, різко проявляються оптичні властивості, зокрема, поглинання електромагнітного випромінювання та фотопровідність.

**Арсенід галію GaAs** займає особливе місце серед з'єднань  $A^{III}B^V$ . Ширина забороненої зони і рухливість електронів дещо більші, ніж германію і кремнію, а рухливість дірок така ж як у кремнію. Цинк, кадмій, мідь є акцепторами, рівні яких лежать вище діапазону валентної зони від 0,08 до 0,37 еВ. Донорами є сірка, селен, телур, а також елементи IV групи таблиці Менделєєва.

З арсеніду галію виготовляють фотоелементи з ККД до 10%, дозиметри рентгенівського випромінювання, тунельні діоди, напівпровідникові лазери, первинні перетворювачі світла, давачі низьких температур тощо. Напівпровідникові прилади з арсеніду галію здатні працювати при температурі 450 °С.

**Антимонід індію InSb** є найбільш дослідженим із всіх з'єднань  $A^{III}B^V$ , що пояснюється простотою його отримання. Він кристалізується в кубічну гранецентричну ґратку, має густину  $D = 5,77 \text{ г/см}^3$ , температуру плавлення  $t_{пл.} = 525 \text{ °С}$  та вузьку ширину забороненої зони  $\Delta W = 0,18 \text{ еВ}$  і при температурі навколишнього середовища стає виродженим напівпровідником, що пояснює його власну електропровідність. Рухливість електронів перевищує  $\mu_n = 10 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Отримують антимонід індію сплавлюванням у атмосфері водню високочистих індію і сурми. Потім вирощують монокристали методом Чохральського [5, 15] з подальшою очисткою методом зонної плавки.

Промисловість випускає монокристалічний антимонід індію у вигляді злитків і пластин з електронною і дірковою електропровідностями з концентрацією носіїв заряду  $10^{20} \div 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Тут для легування використовують цинк, германій, телур. Антимонід індію використовують для виготовлення давачів Холла, оптичних фільтрів, фоторезисторів та термоелектричних генераторів.

### 4.6.3. Напівпровідникові з'єднання типу $A^{II}B^{VI}$

Групу напівпровідникових матеріалів типу  $A^{II}B^{VI}$  складають бінарні з'єднання халькогенів з металами II групи періодичної системи, а саме з цинком, кадмієм, ртуттю. До халькогенів відносять сірку, селен і телур, а з'єднання з цими елементами (сульфіди, селеніди та телуриди) називають *халькогенідами*.

Халькогеніди типу  $A^{II}B^{VI}$  кристалізуються в структури двох типів: кубічну типу сфалериту, що утворюється при низьких температурах, і гексагональну.



Кожний атом в ґратках зв'язаний з чотирма сусідніми, два з яких мають ковалентний характер, а два інших – іонний.

Міцність зв'язку атомів у кристалічній ґратці всередині кожної групи (сульфідів, селенідів та телуридів) зменшується при збільшенні сумарного атомного номера.

Халькогеніди відрізняються між собою шириною забороненої зони  $\Delta W$ , що лежить в межах від 0,02 еВ для телуриду ртуті  $HgTe$  до 3,7 еВ для сульфїду цинку  $ZnS$ . Температура плавлення лежить у діапазоні  $t_{пл.} = 670\div 1830$  °С. В залежності від співвідношення компонентів вони можуть володіти електронною і дірковою електропровідністю. Надлишок металу призводить до появи електронної електропровідності, а надлишок халькогену – до діркової.

З'єднання типу  $A^{II}B^{VI}$  використовують у вигляді полікристалів (плівок та таблеток) і монокристалів.

Технологія отримання з'єднань типу  $A^{II}B^{VI}$  досить проста. Полікристалічні сульфїди і телуриди отримують зазвичай осадкою з водних розчинів солей з сірчаної кислоти. Полікристалічні плівки отримують методом катодного розпилювання у вакуумі з подальшою рекристалізацією. Такі плівки характеризуються високим п'єзомодулем і знаходять застосування з п'єзоелектриками при виготовленні перетворювачів електромагнітних коливань в акустичні в діапазонах високих і надвисоких частот.

**Сульфїд цинку  $ZnS$**  володіє такими властивостями: густина  $D = 4,1$  г/см<sup>3</sup>, температура плавлення  $t_{пл.} = 1830$  °С, ширина забороненої зони  $\Delta W = 3,7$  еВ, рухливість електронів  $\mu_n = 140$  см<sup>2</sup>/В·с, рухливість дірок  $\mu_p = 5$  см<sup>2</sup>/В·с, питомий електричний опір  $\rho = 10^6\div 10^{12}$  Ом·м, що є близьким до опору діелектриків, характеризується електронним типом електропровідності. Для отримання діркової електропровідності застосовують легування елементами І групи періодичної системи.

У вигляді кристалічного порошка сульфїд цинку застосовують для виготовлення люмінофорів різноманітних пристроїв, осцилографічних та телевізійних електронно-променевих трубок, люмінесцентних освітлювальних і цифрових ламп, п'єзопідсилювачів акустичних коливань.

**Сульфїд кадмію  $CdS$**  характеризується такими властивостями: густина  $D = 7,6$  г/см<sup>3</sup>, температура плавлення  $t_{пл.} = 1114$  °С, теплопровідність  $\lambda = 3$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), ширина забороненої зони  $\Delta W = 0,4$  еВ, рухливість електронів  $\mu_n = 600$  см<sup>2</sup>/В·с, рухливість дірок

$\mu_p = 400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , питомий електричний опір в залежності від домішок та температури лежить в межах  $\rho = 10^{-1} \div 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , має електронний тип електропровідності.

Застосовують в якості люмінофорів, а також для виготовлення дозиметрів ультрафіолетових, рентгенівських і гамма-променів.

#### 4.7. Електронно-дірковий перехід (*p-n* перехід)

Електричний перехід між двома областями напівпровідника, одна з яких має електропровідність *p*-типу, а інша – *n*-типу, називають електронно-дірковим переходом або *p-n* переходом. Такі переходи одержують шляхом введення в напівпровідник донорної і акцепторної домішок таким чином, щоб одна частина напівпровідника володіла електронною, а інша – дірковою електропровідністю. Створити електронно-дірковий перехід механічним з'єднанням двох напівпровідників з різними типами електропровідності неможливо. Допустимо, що *n*- і *p*-напівпровідники стикаються один з одним (рис.4.11).

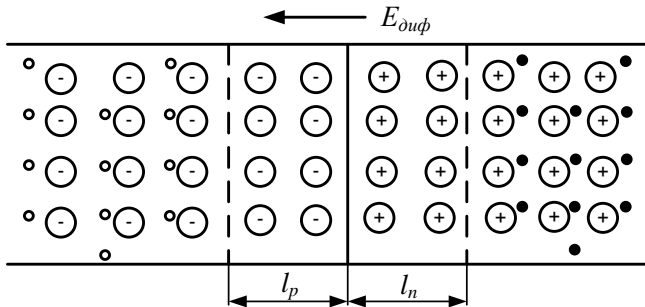


Рис.4.11. Розподіл носіїв заряду в областях напівпровідника за відсутності зовнішнього електричного поля

Оскільки в *n*-напівпровіднику міститься велика кількість електронів, а в *p*-напівпровіднику – дірок, то між ними почнеться обмін носіями зарядів. У результаті цього в приконтатній області напівпровідника *n*-типу утворюється некомпенсований позитивний заряд іонів донорної домішки, а в напівпровіднику *p*-типу виникає негативний заряд іонів акцепторної домішки.

Область розподілу напівпровідників *n*- і *p*-типу виявиться збідненою вільними носіями заряду й, незважаючи на малу ширину ( $h \approx 10^{-6} \div 10^{-8} \text{ м}$ ), буде володіти більшим опором, який значно перевищує опір іншої частини напівпровідників. Наявність негативного

і позитивного об'ємних зарядів призводить до утворення електричного поля, що перешкоджає подальшому дифузійному потоку носіїв заряду. Якщо до  $p$ -області прикласти позитивний полюс джерела живлення, а до  $n$ -області – негативний, то зовнішнє електричне поле буде спрямоване зустрічно електричному полю, зумовленому об'ємними зарядами (рис.4.12).

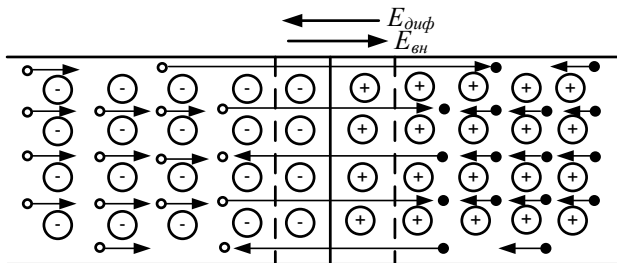


Рис.4.12. Розподіл носіїв заряду в областях напівпровідника (зовнішнє електричне поле спрямоване зустрічно дифузійному)

Основні носії заряду в  $p$ - і  $n$ -напівпровідниках, які мають найбільшу енергію, одержують можливість проникнути через збіднений шар в області, де вони рекомбінуються. При такій полярності зовнішньої напруги електронно-дірковий перехід буде «відкритий» і через нього протікатиме прямий струм. При зміні полярності зовнішньої напруги електричне поле об'ємних зарядів і зовнішнє поле будуть збігатися за напрямком. У результаті дії сумарного електричного поля основні носії починають рухатися від переходу й перетнути перехід зможуть тільки неосновні носії (рис.4.13).

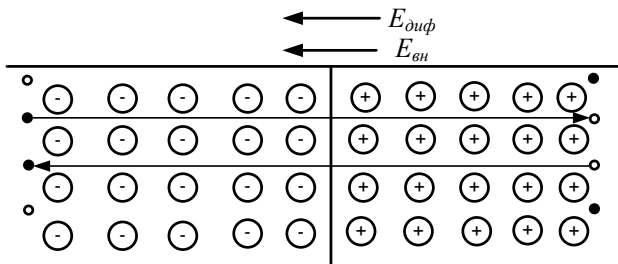


Рис.4.13. Розподіл носіїв заряду в областях напівпровідника (зовнішнє електричне поле збігається за напрямком з дифузійним)

Вольт-амперна характеристика  $p$ - $n$  переходу наведена на рис.4.14. Для опису цієї залежності використовується вираз [8]

$$I = I_S \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (4.15)$$

де  $I_S$  – струм насичення (при зворотному включенні  $p$ - $n$  переходу  $I_S = I_{36}$ );  $U$  – прикладена електрична напруга;  $q/k \approx 40 \text{ В}^{-1}$  при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Оскільки кількість неосновних носіїв у багато разів менша основних, то й струм, викликаний ними, буде меншим, ніж струм, що з'являється під час прямого включення. Як видно з рис.4.14, вольт-амперна характеристика для наочності має нерівномірний масштаб.

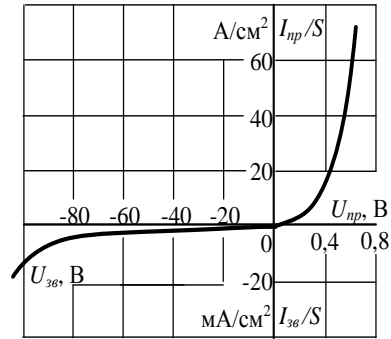


Рис.4.14. Вольт-амперна характеристика  $p$ - $n$  переходу

Таким чином, система двох областей напівпровідника з різними типами електропровідностей не пропускає струм в зворотньому напрямі. Цю властивість широко використовують у напівпровідникових випрямлячах (діодах). При прикладанні до такої системи високої зворотної електричної напруги в місці  $p$ - $n$  переходу може відбутись електричний пробій. При прикладанні до системи двох напівпровідників змінної синусоїдної напруги  $p$ - $n$  перехід буде пропускати струм тільки при прикладеній до нього однієї півхвилі змінної напруги. Для отримання форми напруги близької до постійної використовують систему з чотирьох і більше діодів, з'єднаних за відповідними схемами, а також  $R$ - $C$  фільтри для згладження пульсацій випрямленої напруги.

Якщо у напівпровідників є дві ділянки з різними температурами, то це викликає переміщення вільних зарядів з нагрітої ділянки в холодну. Так, якщо носіями струму є електрони, то вони, переміщуючись до холодної ділянки, зарядять її від'ємним зарядом. Нагріта ділянка напівпровідника, віддавши частину електронів, отримає додатний заряд. В результаті цього між нагрітою і холодною ділянками напівпровідника виникає термоелектрорушійна сила ТЕРС. Це явище використовується при виготовленні термоелементів і термогенераторів, які можуть перетворювати теплову енергію безпосередньо у електричну.

## Контрольні запитання

1. Поясніть, які матеріали називаються напівпровідниковими?
2. Назвіть основні властивості напівпровідників.
3. Вкажіть, які енергетичні зони існують у напівпровідникових матеріалах.
4. Перелічіть зовнішні фактори, які впливають на електропровідність напівпровідників.
5. Поясніть методика визначення типу провідності в напівпровідниках.
6. Чи може домішковий напівпровідник мати власну електропровідність?
7. Поясніть, які домішки в напівпровідниках є донорами, а які акцепторами?
8. Що таке електронна і діркова провідність?
9. Що таке власний напівпровідник і які властивості він має?
10. Поясніть, у чому полягає ефект Холла і за яких умов він виникає?
11. Перелічіть особливості режимів роботи р-п переходу.
12. Які напівпровідникові пристрої ви знаєте і який принцип їх дії?
13. Які переваги мають пристрої на основі напівпровідників?
14. Поясніть температурну залежність концентрації носіїв заряду в напівпровідника.
15. Поясніть вплив освітленості на провідність напівпровідника.
16. Назвіть основні елементи, кристали яких є напівпровідниками. Які з них мають найбільше значення для електронної техніки?
17. Що служить сировиною для напівпровідникових кремнію та германію?
18. Перелічіть основні технологічні операції, які застосовуються у виробництві напівпровідників.
19. Який тип хімічного зв'язку характерний для напівпровідникових сполук  $A^{III}B^V$ ?
20. Охарактеризуйте властивості напівпровідникових сполук  $A^{IV}B^{IV}$ ,  $A^{II}B^{VI}$ .

## РОЗДІЛ 5. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

### 5.1. Основні характеристики магнітних матеріалів

Всі речовини у природі є магнітними, тобто вони взаємодіють із зовнішнім магнітним полем і володіють визначеними магнітними властивостями, які зумовлені внутрішніми прихованими формами руху електричних зарядів. За силою взаємодій з магнітним полем всі речовини можна розділити на слабوماгнітні і сильномагнітні. Сила взаємодії речовини з магнітним полем оцінюється безрозмірною величиною – магнітною сприйнятливістю  $\chi$ .

Намагніченість  $\vec{J}$  є векторною величиною і спрямована або паралельно або перпендикулярно до напруженості магнітного поля  $\vec{H}$

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H}. \quad (5.1)$$

Намагнічена речовина, що перебуває у зовнішньому полі створює власне поле. Тому сумарна магнітна індукція [5]

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1 = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}, \quad (5.2.)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна постійна.

Ураховуючи (5.1), (5.2), отримаємо:

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}. \quad (5.3)$$

Безрозмірна величина  $\mu = (1 + \chi)$  називається відносною магнітною проникністю речовини і показує у скільки разів магнітна індукція  $\vec{B}$  поля в середовищі з даним матеріалом, більша ніж магнітна індукція  $\vec{B}_0$  у вакуумі.

За реакцією матеріалу на зовнішнє магнітне поле всі речовини в природі поділяють на п'ять груп: діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, феримагнетики і антиферомагнетики.

До *діамагнетиків* відносяться речовини, в яких магнітна сприйнятливість від'ємна ( $\chi < 0$ ) й не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Діамагнітний ефект зумовлений незначною зміною кутової швидкості орбітального обертання електронів. Якщо електронну орбіту розглядати як замкнутий контур, який не володіє активним опором, то під дією зовнішнього поля в цьому контурі змінюється сила струму й виникає додатковий магнітний момент. Відповідно до закону Ленца цей момент спрямова-

ний назустріч зовнішньому полю. У тому випадку, коли площина електронної орбіти розташована не перпендикулярно до вектора  $\vec{H}$ , то зовнішнє магнітне поле викликає прецесійний рух орбіти навколо напрямку  $\vec{H}$ . При цьому вектор орбітального магнітного моменту описує конус. Кутова швидкість прецесії визначає значення від'ємного магнітного моменту  $\Delta M$ . Діамагнітний ефект має місце у всіх речовинах, але виступає на перший план у тих випадках, коли власний момент атомів дорівнює нулю, тобто спінові магнітні моменти попарно скомпенсовані.

Чисельне значення магнітної сприйнятливості діамагнетиків становить  $-(10^{-6} \div 10^{-7})$ . Відносна магнітна проникність цих речовин незначна ( $\mu < 1$ ). Зовнішнім проявом діамагнітного ефекту є виштовхування цих речовин з неоднорідного магнітного поля. Діамагнетики характеризуються тим, що послаблюють всередині себе це магнітне поле, яке діє ззовні. Це проходить внаслідок того, що їх намагніченість напрямлена проти зовнішнього поля. До них відносяться: інертні гази, водень, азот, вода, мідь, срібло, золото, свинець та більшість органічних з'єднань. Діамагнетиками є також речовини у надпровідному стані.

**Парамагнетики** відрізняються тим, що при поміщенні цих речовин у магнітне поле вони підсилюють його всередині себе ( $\chi > 0$ ). Це проходить із-за співпадання напрямку намагніченості парамагнетиків з напрямом зовнішнього поля.

До парамагнетиків відносяться речовини з додатньою магнітною сприйнятливістю, що не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля, а саме: алюміній, платина, хром, вольфрам, кисень, лужні й лужноземельні метали, солі заліза, кобальту, нікелю та інші. У парамагнетиках атоми мають елементарні магнітні моменти навіть за відсутності зовнішнього магнітного поля, однак через тепловий рух ці магнітні моменти розподілені хаотично, в результаті чого намагніченість речовини в цілому дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле викликає переважну орієнтацію магнітних моментів атомів в одному напрямку, але тепла енергія протидіє створенню магнітної впорядкованості. У зв'язку з цим парамагнітна сприйнятливість сильно залежить від температури. За нормальної температури магнітна сприйнятливість парамагнетиків дорівнює  $10^{-4} \div 10^{-6}$ . Тому їхня магнітна проникність невисока і дещо більша одиниці ( $\mu > 1$ ). Завдяки додатній намагніченості парамагнетики, поміщені в неоднорідне магнітне поле, втягуються в нього.

Парамагнітний ефект за своєю фізичною природою аналогічний дипольно-релаксаційній поляризації.

До **феромагнетиків** відносяться речовини з великою додатною магнітною сприйнятливістю (до  $10^6$ ), що сильно залежить від напруженості магнітного поля й температури. Для феромагнетиків характерна внутрішня магнітна впорядкованість, що полягає в існуванні макроскопічних областей з паралельно орієнтованими магнітними моментами атомів. Ці речовини здатні намагнічуватися до насичення у відносно слабких магнітних полях. На рис.5.1 показано залежності  $J = f(H)$  для магнітних матеріалів.

Інша особливість полягає в тому, що вище визначеної температури, яка називається температурою Кюрі  $T_K$ , феромагнітний стан речовини переходить у парамагнетний, тобто магнітна сприйнятливість знижується на 3÷4 порядки. До феромагнетиків відносять залізо, нікель, кобальт та їх сплави, сплави хрому, марганцю та інші.

На рис.5.2 показано залежності відносної магнітної проникності для деяких марок феритів: 1 – 4000 НМ, 2 – 3000 НМ, 2000 НМ, 3 – 1000 НМ, 5 – 400 НМ.

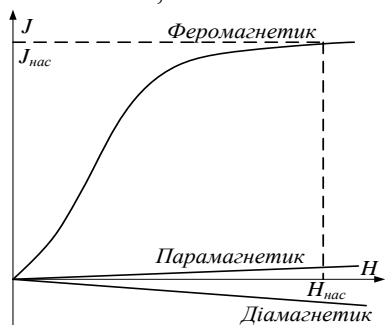


Рис.5.1. Залежності намагніченості від напруженості магнітного поля

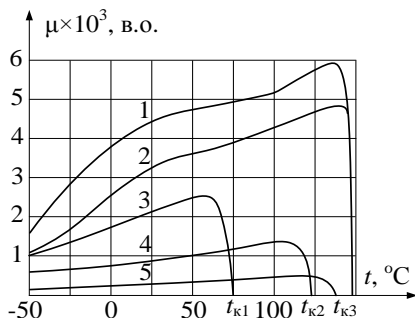


Рис.5.2. Температурні залежності  $\mu = f(T)$  для деяких марок феритів

**Феримагнетики** – це речовини, що отримали назву від складних оксидних матеріалів – феритів. Вони мають властивості, що подібні до властивостей феромагнетиків, але значно поступаються їм за величиною допустимої намагніченості. Під феритами розуміють з'єднання оксиду заліза  $Fe_2O_3$  з оксидом металу  $MeO$  типу  $MeO \cdot Fe_2O_3$ . Магнітні властивості феримагнетиків тісно пов'язані із взаємним розміщенням у кристалічній ґратці іонів заліза і металу. Магнітні властивості матеріалів зумовлені внутрішніми прихованими формами руху електричних зарядів, що є елементарними кру-



говими струмами. Такими круговими струмами є: обертання електронів навколо власних осей – електронні спіни і орбітальний рух електронів у атомах. Явище феромагнетизму пов'язано з утворенням всередині деяких матеріалів нижче точки Кюрі таких кристалічних структур, за яких у межах макроскопічних областей, що називаються магнітними доменами, електронні спіни є орієнтованими паралельно один одному і однаково направлені. Таким чином, характерним для феромагнітного стану речовини є наявність в ньому самовільної (спонтанної) намагніченості без прикладання зовнішнього магнітного поля.

**Антиферомагнетиками** є речовини, в яких нижче деякої температури виникає антипаралельна орієнтація елементарних магнітних моментів однакових атомів або іонів кристалічних решіток. Вони характеризуються незначною позитивною магнітною сприйнятливістю ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$ ), що дуже залежить від температури. При нагріванні антиферомагнетик зазнає фазового переходу у парамагнітний стан. Усього відомо близько тисячі з'єднань з властивостями антиферомагнетиків. Представниками антиферомагнетиків є хром, марганець, германій і т.д.

## 5.2. Фізичні процеси при намагнічуванні феромагнетиків

У монокристалах феромагнітних речовин існують напрями легкого й важкого намагнічування. Число таких напрямів визначається симетрією кристалічних решіток. У відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів мимовільно орієнтуються уздовж однієї з осей легкого намагнічування (рис.5.3).

Елементарна частинка заліза є об'ємоцентрованим кубом. Напрямок легкого намагнічування збігається з ребром куба. Отже, у монокристалі заліза можна виділити шість еквівалентних напрямків легкого намагнічування. Для намагнічування монокристалічного зразка до насичення уздовж однієї з осей легкого намагнічування потрібно затратити значно меншу

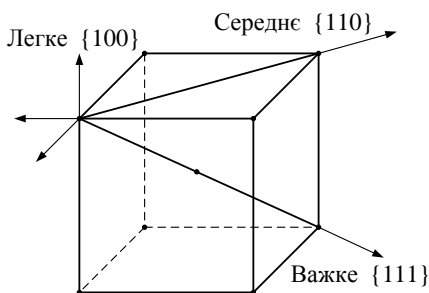


Рис.5.3. Напрями легкого, середнього й важкого намагнічування в монокристалі заліза

енергію, ніж для такого ж намагнічування уздовж осі важкого намагнічування.

Залежність магнітної індукції макрооб'єму феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля називають кривою намагнічування (рис.5.4). Зростання індукції під дією зовнішнього поля зумовлено двома основними процесами: зсувом доменних границь і поворотом магнітних моментів доменів.

Початковій ділянці кривої (область 1) відповідає оборотне (пружне) зміщення границь доменів. При цьому відбувається збільшення об'єму тих доменів, магнітні моменти яких утворюють найменший кут з напрямом зовнішнього поля і зменшення розмірів доменів з несприятливою орієнтацією вектора спонтанної намагніченості. Після зняття слабкого поля границі доменів повертаються в попереднє положення.

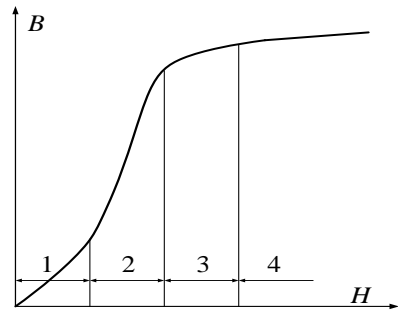


Рис.5.4. Крива намагнічування феромагнетика

В області більш сильних полів (область 2) зсув доменних границь має необоротний, стрибкоподібний характер. На ділянці необоротного зсуву доменних границь крива намагнічування має найбільшу крутизну.

При подальшому збільшенні напруженості магнітного поля зростає роль другого механізму намагнічування – механізму обертання, при якому магнітні моменти доменів з напрямку легкого намагнічування поступово повертаються у напрямку поля (область 3).

Коли всі магнітні моменти доменів орієнтуються уздовж поля, настає технічне насичення (область 4). Незначне зростання індукції на ділянці насичення зумовлено збільшенням намагніченості самого домена. Строго паралельне розташування спінових моментів у домені можливе тільки за температур, близьких до абсолютного нуля. При підвищенні температури за рахунок теплової енергії впорядкованість у розташуванні спінів порушується. Зовнішнє поле повертає спіни до паралельної орієнтації. Цим досягається ефект збільшення намагніченості.

Властивості феромагнетиків впливають на характеристики виробів, в яких їх використовують. До основних магнітних властивостей відносяться: магнітний потік, магнітна індукція, магніторухливість, магнітна сприйнятливість, магнітна проникність, втрати на гістерезис або перемагнічування і втрати на вихрові струми.

Для феромагнітних матеріалів співвідношення (5.1) є нелінійним, оскільки магнітна сприйнятливість залежить від напруженості магнітного поля. Тобто, магнітна індукція є функцією напруженості магнітного поля  $H$ . Її визначають за виразом [3, 8]:

$$B = \mu H. \quad (5.4)$$

Аналітичний вираз функції (5.4) у загальному випадку є складним, тому користуються графічними залежностями:

$$J = \psi H \quad \text{або} \quad B = f H, \quad (5.5)$$

які називаються кривими намагнічування і визначаються експериментально.

Особливістю структури феромагнітних матеріалів є наявність *магнітних доменів* – макроскопічних областей, в яких магнітні моменти окремих атомів орієнтовані взаємно паралельно. Напрямки магнітних моментів окремих доменів розподілені хаотично, а магнітний потік такого зразка дорівнює нулю.

На рис. 5.5. приведена схема орієнтації спінів у доменах при намагнічуванні феромагнетика.

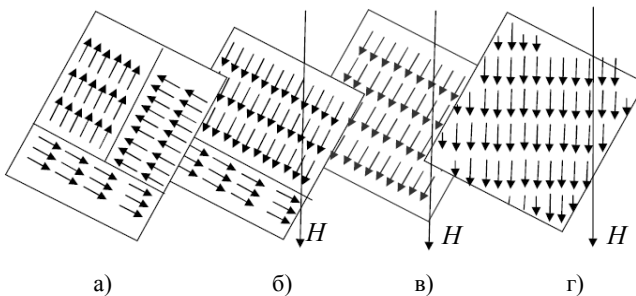


Рис.5.5. Схема орієнтації спінів у доменах при намагнічуванні феромагнетика: а) поле відсутнє; б) слабе поле; в) сильне поле; г) насичення

Під дією зовнішнього магнітного поля відбувається перебудова доменної структури, що призводить до намагнічування феромагнітного матеріалу (рис.5.6).

Процес намагнічування можна уявити наступним чином. У слабких полях проходить поворот векторів магнітних моментів доменів, що складають найбільший кут з напрямом поля, у більш енергетично вигідні напрями. Іншими словами, має місце ріст об'ємів доменів, в яких магнітний момент, напрямлений по осі легкого намагнічування, складає найменший кут з напрямом поля за рахунок зменшення об'ємів доменів, у яких цей кут найбільший. Цей процес є зворотним і називається зворотним процесом зміщення границь доменів. При збільшенні поля вектори магнітних моментів всіх доменів повертаються у найвигідніше енергетичне положення. Оскільки в цьому процесі бере участь значно більша кількість доменів, ніж на початковій ділянці, процес намагнічування йде більш інтенсивно і крива намагнічування йде крутіше. Цей процес є незворотним, тобто за відсутності зовнішнього поля магнітний стан уже не повертається у вихідний, тому його називають процесом незворотного зміщення границь доменів. При подальшому збільшенні поля починається поступовий поворот вектора магнітного моменту, що співпадає з напрямом зовнішнього поля і магнітний стан матеріалу досягає технічного насичення.

При циклічній зміні напруженості постійного магнітного поля від 0 до  $+H_1$ , від  $+H_1$  до  $-H_1$  і знову до  $+H_1$  крива зміни магнітної індукції має форму замкненої кривої – петлі гістерезису. Для сильних полів крива (петля) має вид еліпса. При збільшенні  $H_1$  отримуємо серію замкнених одна в одну петель гістерезису, поки не дійдемо до граничної петлі гістерезису, що є важливою технічною характеристикою магнітного матеріалу.

Гранична петля гістерезису характеризується максимальним досягненням значення індукції  $B_S$  (індукція насичення).

Характерно, що при зменшенні напруженості магнітного поля від  $H_1$  до 0 магнітна індукція не дорівнює нулю, а зберігає величину залишкової індукції  $B_r$ . Для доведення  $B_r$  до нуля необхідно

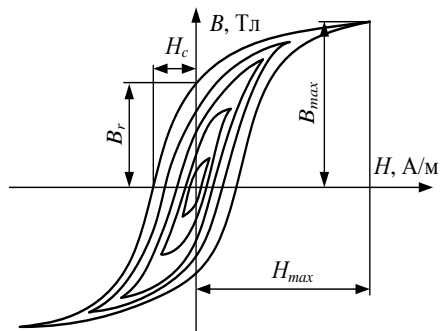


Рис.5.6. Сімейство гістерезисних циклів

прикласти протилежно напрямлене розмагнічуюче поле визначеної сили  $-H_c$ , яке характеризує коерцитивну силу матеріалу.

Якщо з'єднати між собою точки вершин петель гістерезису, які отримані при послідовно зростаючих максимальних значеннях напруженості магнітного поля, то крива, що є геометричним місцем цих точок, називається основною кривою намагнічування. Ця крива є важливою характеристикою магнітних матеріалів.

Для характеристики поведінки магнітних матеріалів у полі з напруженістю  $H$  користуються поняттями абсолютної проникності  $\mu_a$ , що вимірюється в Гн/м і відносною магнітною проникністю  $\mu$ :

$$\mu_a = \frac{B}{H}; \quad \mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \frac{\mu_a}{\mu_0}. \quad (5.6)$$

Відносну магнітну проникність матеріалу  $\mu$  отримують по основній кривій намагнічування як відношення індукції  $B$  до відповідного значення напруженості магнітного поля  $\mu_0 \cdot H$

Використовуючи наглядні геометричні побудови (рис.5.7), можна легко побачити, що:

$$\mu_n = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{K_B}{K_H} \cdot \operatorname{tg} \alpha_H; \quad \mu_{max} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{K_B}{K_H} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{max}, \quad (5.7)$$

де  $K_B$  і  $K_H$  – масштабні коефіцієнти по осях  $B$  і  $H$  відповідно.

На рис.5.8 показано залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля для феромагнетика

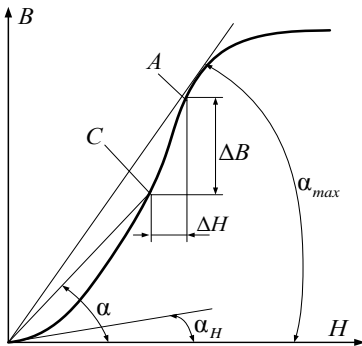


Рис.5.7. Графічне визначення магнітної проникності

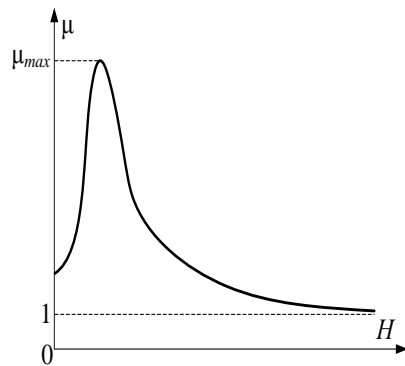


Рис.5.8. Залежність  $\mu = f(H)$

Таким чином, нахил дотичної на початковій ділянці кривої намагнічування характеризує початкову проникність, а нахил прямої, проведеної в точку верхнього перегину кривої намагнічування, відповідає максимальній проникності.

При намагнічуванні матеріалу змінним полем петля гістерезису розширюється, збільшуючи свою площу. Таку петлю називають динамічною.

Відношення магнітної індукції до напруженості поля за цією кривою називають динамічною магнітною проникністю

$$\mu_{\sim} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{max}}{H_{max}}. \quad (5.8)$$

Зі збільшенням частоти поля динамічна проникність зменшується із-за інерційності магнітних процесів. При використанні магнітних матеріалів одночасно у постійному  $H_{\sim}$  і змінному  $H_{\sim}$  магнітних полях проникність цих матеріалів характеризують величиною диференційної проникності.

Магнітні матеріали з малим значенням  $H_c$  і великою магнітною проникністю називають *магнітом'якими*; матеріали з великою коерцитивною силою і меншою проникністю – *магнітотвердими*.

### 5.3. Магнітні втрати

У змінних магнітних полях перемагнічування феромагнетика супроводжується втратами, що викликають нагрівання матеріалу. У загальному випадку втрати на перемагнічування складаються із втрат на гістерезис і втрат на вихрові струми.

Втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування, віднесені до одиниці об'єму речовини (питомі втрати), визначають за формулою [3]:

$$P_r = \frac{\oint HdB}{V}, \text{ Дж/м}^3. \quad (5.9)$$

При перемагнічуванні матеріалу з частотою  $f$  потужність втрат на гістерезис на одиницю маси знаходять за формулою:

$$P_r = f \frac{\oint HdB}{D}, \text{ Вт/кг}. \quad (5.10)$$

де  $D$  – густина матеріалу.

У змінному магнітному полі всередині магнітного матеріалу індуються вихрові струми, які також є причиною розсіяння енергії. Вихрові струми виникають у провідному середовищі за рахунок ЕРС самоіндукції, що пропорційна швидкості зміни магнітного потоку.

Звідси впливає відмінність статичних петель гістерезиса від динамічних: якщо статичні петлі характеризують лише втрати на гістерезис, то динамічні включають сумарні втрати на гістерезис і вихрові струми, тобто під час намагнічування змінним полем петля гістерезиса розширюється. Причому втрати на гістерезис за один період зміни зовнішнього поля залишаються постійними в досить широкому діапазоні частот, а втрати на вихрові струми зростають пропорційно частоті.

Втрати на вихрові струми залежать не тільки від магнітних, але й від електричних властивостей матеріалу (питомого опору  $\rho$ ), а також від форми і конструкції магнітного сердечника. Для листового зразка товщиною  $h$  з питомим опором  $\rho$  ці втрати виражаються емпіричною формулою:

$$P_B = \frac{1,6 \cdot h^2 f^2 B_{max}^2}{D \cdot \rho}, \text{ Вт/кг.} \quad (5.11)$$

Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопроводи збирають із магнітних матеріалів підвищеного питомого опору  $\rho$ , крім цього використовують тонкі пластини, що ізолювані одна від одної. Все це дає змогу зменшити вплив поверхневого ефекту на опір провідника при високих частотах.

Втрати, пов'язані із залишковим магнетизмом, враховують при використанні феромагнетиків в імпульсних режимах.

Розглянемо еквівалентну схему й векторну діаграму індуктивної котушки з магнітним осердям (рис.5.9). Власною ємністю й опором обмотки індуктивної котушки нехтуємо.

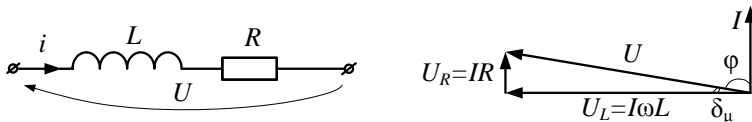


Рис.5.9. Еквівалентна схема заміщення й векторна діаграма індуктивної котушки з магнітним осердям

Кут  $\delta_\mu$  називається кутом магнітних втрат. З векторної діаграми випливає, що тангенс кута магнітних втрат дорівнює:

$$\operatorname{tg}\delta = R/\omega L. \quad (5.12)$$

З урахуванням цього, активну потужність можна визначити за формулою

$$P_a = I^2 \omega L \operatorname{tg}\delta_\mu. \quad (5.13)$$

Величина, зворотна до  $\operatorname{tg}\delta$  називається добротністю феромагнетика.

#### 5.4. Класифікація магнітних матеріалів

Застосовувані в електрорадіотехніці магнітні матеріали розділяються на дві основні групи: магнітом'які й магнітотверді.

Терміни «магнітом'які» і «магнітотверді» не відносяться до механічних властивостей матеріалу. Деякі механічно тверді матеріали є магнітом'якими, а механічно м'які матеріали можуть відноситись до магнітотвердим. Основним для поділу магнітних матеріалів на магнітотверді і магнітом'які є наступні особливості. Процеси намагнічування цих матеріалів протікають однаково. На рис.5.10 показано петлі гістерезису для магнітом'яких (1) і магнітотвердих (2) матеріалів.

Згідно кривої намагнічування зміщення границь доменів, характерно для магнітом'яких матеріалів потребує менших затрат, ніж процеси обертання магнітних моментів і парапроцес для магнітотвердих матеріалів.

Основна різниця між магнітом'якими і магнітотвердими матеріалами полягає в різних значеннях коерцитивних сил  $H_c$  (див. рис.5.6).

Так, для магнітотвердих матеріалів найбільша коерцитивна сила може становити  $H_c = 4000$  А/м, а для магнітом'яких всього  $H_c = 1$  А/м.

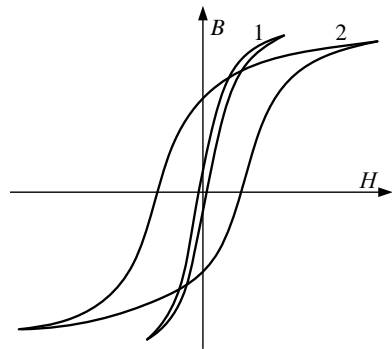


Рис.5.10. Форми петель гістерезиса



### 5.4.1. Магнітом'які матеріали

*Магнітом'які* матеріали, володіючи високою магнітною проникністю, невеликою коерцитивною силою і магнітними втратами на гістерезис, використовуються в якості сердечників трансформаторів, електромагнітів, у вимірювальних пристроях та в інших випадках, де необхідно при найменшій затраті енергії досягти найбільшої індукції. Магнітом'які матеріали легко намагнічуються і мають вузьку петлю гістерезису, тобто невелику площу при високих значеннях індукції.

Основні вимоги до магнітом'яких матеріалів наступні:

– повинні мати велику індукцію насичення, тобто пропускати максимальний магнітний потік через задану площу поперечного перерізу магнітопроводу. Це дасть змогу зменшити габаритні розміри й масу магнітної системи;

– повинні мати якнайменші втрати на перемагнічування у змінних магнітних полях. Як правило, магнітопроводи збирають з окремих ізольованих один від одного листях або стрічок, які повинні мати високу пластичність для полегшення процесу виготовлення виробів з них;

– повинні мати стабільність властивостей у процесі експлуатації, а також під час впливу таких зовнішніх факторів як температура й механічні напруження.

До магнітом'яких матеріалів належать різні марки заліза: (технічно чисте залізо, низьковуглецева електротехнічна сталь листова, електролітичне залізо, карбонільне залізо, кремнієва електротехнічна сталь, пермалої, альсифери.

**Технічно чисте залізо**, що містить не менше 0,05% домішок отримують складними технологічними способами. Воно має найвищі значення індукції насичення ( $B_s = 2,2$  Тл) з усіх феромагнітних матеріалів, низький питомий опір  $\rho$ , тому його використовують для виробів, що працюють у постійних магнітних полях. До найбільш небажаних домішок відносять: вуглець, кисень і сірку.

Коерцитивна сила і магнітна проникність  $\mu$  змінюються в широких межах. Таке залізо є технологічним, легко штампується і обробляється, має низьку вартість. Технічно чисте залізо застосовують як шихтований матеріал для отримання майже всіх феромагнітних сплавів. Широко застосовують також електролітичне та карбонільне залізо.

**Низьковуглецева електротехнічна сталь** – це один із різновидів технічно чистого заліза, випускається у виді листів товщиною 0,2÷4 мм, містить не більше 0,04% вуглецю і 0,6% інших домішок. Максимальне значення магнітної проникності для різних марок – не менше  $\mu_{max} = 3500 \div 4500$ , коерцитивна сила – відповідно не більше 100÷165 А/м.

**Кремнієва електротехнічна сталь** є основним магнітм'яким матеріалом масового споживання. Введенням у склад цієї сталі кремнію досягається підвищення питомого опору, що викликає зменшення втрат на вихрові струми. Наявність кремнію у сталі покращує її склад, оскільки кремній зв'язує частину розчинених у металі газів, в першу чергу кисень. Легування кремнієм забезпечує покращені магнітні властивості сталі. Збільшується магнітна проникність сталі, знижується коерцитивна сила і втрати при перемагнічуванні. Сталь маркується чотирма цифрами. Перші три цифри разом означають тип сталі, четверта – порядковий номер типу сталі. Сталь, що містить до 4% кремнію, володіє доволі хорошими механічними властивостями, а за наявності домішок вище 5% кремнію вона стає більш крихкою.

Сталь електротехнічну тонколистову поділяють і маркують так:

а) за структурним станом й видом прокатки на класи (перша цифра марки: 1 – гарячекатана ізотропна, 2 – холоднокатана ізотропна, 3 – холоднокатана анізотропна з ребристою текстурою;

б) за вмістом кремнію (друга цифра марки): 0 – із вмістом кремнію до 0,4% (нелегована); 1 – від 0,4 до 0,8%; 2 – від 0,8 до 1,8%; 3 – від 1,8 до 2,8%; 4 – від 2,8 до 3,8%; 5 – від 3,8 до 4,8%;

в) за основною нормованою характеристикою на групи (третья цифра в марці): 0 – питомі втрати при магнітній індукції 1,7 Тл і частоті 50 Гц; 1 – при 1,5 Тл і 50 Гц; 2 – при 1,0 Тл і 400 Гц; 6 – магнітна індукція у слабких магнітних полях при напруженості поля 0,4 А/м; 7 – магнітна індукція в середніх магнітних полях при 10 А/м.

**Пермалої** – це низькокоерцитивні сплави заліза і нікелю. Основні магнітні властивості цих сплавів залежать від вмісту нікелю. Найбільшу магнітну проникність має сплав що містить 78,5% Ni. Дуже легку намагнічуваність пермалоїв у слабких полях пояснюють відсутністю в них анізотропії. Їх магнітні властивості чуттєві до зовнішніх механічних напружень, залежать від хімічного складу домішок у сплаві. Індукція насичення високонікелевих пермалоїв майже в два рази нижча, ніж у електротехнічній сталі. Магнітна

проникність суттєво знижується із збільшенням частоти, що пояснюється виникненням в матеріалі значних вихрових струмів із-за невеликого питомого опору. Введенням у склад пермалоїв молібдену і хрому підвищується питомий опір і початкова магнітна проникність, але з іншого боку одночасно знижується магнітна індукція насичення. Для надання спалавам необхідних властивостей у їх склад вводять домішки, такі як молібден, хром, кремній, марганець, мідь для підвищення питомого опору і зменшення чутливості до механічних деформацій.

Пермалої випускають декількох груп, кожна з яких містить ще ряд марок. У марках пермалоїв використовують наступні літерні позначення: Н – нікель, К – кобальт, М – марганець, Х – хром, С – кремній, Д – мідь. Додаткова буква У означає сплав з поліпшеними властивостями, П – з прямокутною петлею гістерезиса. Цифра в марці вказує процентний вміст нікелю.

Сплави 45Н і 50Н застосовують для виготовлення осердь малогабаритних силових трансформаторів, дроселів, реле і деталей магнітних кіл, що працюють при підвищених індукціях без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням. Зі сплаву 50НХС виготовляють осердя імпульсних трансформаторів і апаратури зв'язку звукових і високих частот. Сплави 79НМ, 80НХС, 76НХД використовують для виготовлення осердя малогабаритних трансформаторів, реле і магнітних екранів при товщині 0,02 мм, сердечників імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів і безконтактних реле.

**Альсифери** – сплави заліза з кремнієм і алюмінієм. Оптимальний склад альсиферу: 9,5 % *Si*; 5,6 % *Al*, 84,9 % *Fe*. Основні властивості альсиферу:  $\mu_{rn} = 35500$ ,  $\mu_{rmax} = 120000$ ,  $H_c = 1,8$  А/м,  $\rho = 0,8$  мкОм·м, тобто не поступаються властивостям нікелевих пермалоїв. Завдяки крихкості альсиферу його можна використовувати як порошок для виготовлення пресованих сердечників, а також виготовлення деталей, що працюють у постійних магнітних полях (екрани, деталі магнітопроводів).

При підвищенні частоти перемагнічування в діапазоні високих частот (до десятків МГц) втрати на вихрові струми у магнітом'яких сплавах настільки зростають, що їх використання стає абсолютно неефективним. Як відомо, втрати на вихрові струми зменшують зниженням магнітної індукції і підвищенням питомого опору. Малим значенням магнітної індукції і високим значенням

питомого опору характеризуються немагнітні матеріали: магнітодіелектрики та магнітом'які ферити.

**Магнітодіелектрики** представляють собою пресований магнітний матеріал, що складається з частинок феромагніту та зв'язуючого – органічного чи неорганічного діелектрика. Як феромагнетик використовують карбонільне залізо, альсифер або молібденовий пермалой, додатково легований сіркою. Сірку в пермалой вводять для додання крихкості. Як зв'язувач використовують фенолформальдегідні смоли, полістирол, каучук. Зв'язувач повинен бути досить еластичним та хімічно стійким до феромагнетика та утворювати тонку суцільну плівку між його частинками. Магнітодіелектрик повинен мати малі втрати та стабільність магнітної проникності в часі та при змінах температури.

Пресування магнітодіелектриків тиском та термообробка стабілізують їх параметри. В результаті отримують вироби значно вищих класів точності з меншими затратами у порівнянні з феритами. Однак за деякими параметрами вони поступаються феритам.

Пресовані сердечники з магнітодіелектриків застосовують в індуктивних котушках фільтрів, генераторів, частотомірів. Введення такого сердечника в котушку збільшує її індуктивність і відповідно її індуктивний опір у порівнянні з активним опором. Це дає змогу суттєво підвищити добротність котушки. Такі сердечники характеризуються малими втратами, додатним коефіцієнтом магнітної проникності в широкому діапазоні частот.

**Ферити** – це оксидні магнітні матеріали, у яких спонтанна намагніченість доменів зумовлена нескомпенсованим антиферомагнетизмом. Представляють собою магнітну кераміку з незначною електронною електропровідністю, яку отримують спіканням заліза з оксидами металів, тобто це іонні з'єднання типу  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , які за хімічною природою є солями. Більшість феритів мають симетричну кубічну кристалічну ґратку. Проте деякі ферити (ферит барію) мають несиметричні гексагональні ґратки.

Як магнітно-м'які матеріали найширше застосовують нікельцинкові та марганець-цинкові ферити. За електричними властивостями ферити відносяться до напівпровідників або до діелектриків, тому втрати на вихрові струми у феритах дуже малі. Крім того, вони мають високу діелектричну проникність, що призводить до зниження швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль у феритах.

Ферити характеризуються дуже низькими значеннями індукції насичення  $B_s = (0,2 \div 0,5)$  Тл, тому їх застосовують в областях слабких струмів. Основними характеристиками магнітом'яких феритів є індукція насичення  $B_s$ , магнітна проникність  $\mu$ , тангенс кута магнітних втрат  $tg\delta_m$ , критична частота  $f_{kp}$ , температурний коефіцієнт магнітної проникності  $\alpha_m$ .

Для магнітом'яких феритів початкова магнітна проникність складає  $\mu_{поч} = 20 \div 20000$ , максимальна магнітна проникність  $\mu_{max} = 35000$ . У слабких полях ферити з магнітною проникністю  $\mu = 400 \div 20000$  замінюють листовими залізонікелевими сплавами та електротехнічною сталлю. У середніх і сильних полях низької частоти використовувати магнітом'які ферити неефективно, так як вони мають у два-три рази меншу індукцію насичення, ніж металічні магнітні матеріали.

Магнітні втрати, у феритах оцінюють величиною  $tg\delta_m$ , що включає в себе втрати на гістерезис, вихрові струми. У слабких полях втрати на гістерезис малі. Втратами на вихрові струми можна знехтувати із-за високого питомого опору  $\rho$ .

Для феритів характерна відносно велика діелектрична проникність  $\epsilon$ , що зменшується з підвищенням частоти. Так, нікельцинковий ферит, з початковою проникністю  $\mu_{поч} = 200$  при частоті 1 кГц має  $\epsilon = 400$ , а на частоті 10 МГц  $\epsilon = 15$ . Найбільш високі значення  $\epsilon$  спостерігаються у марганець-цинкових феритів (сотні тисячі).

Магнітом'які ферити застосовуються як сердечники контурних котушок постійної та змінної індуктивностей, фільтри в апаратурі радіо- і проводового зв'язку, сердечники імпульсних широко-смугових трансформаторів, магнітні модулятори і підсилювачі.

## 5.4.2. Магнітотверді матеріали

Характеристиками *магнітотвердих* матеріалів для постійних магнітів служать велика коерцитивна сила, залишкова індукція і максимальна енергія, що віддається магнітом у навколишнє середовище. Для них характерна велика площа петлі гістерезису. Магнітна проникність матеріалів для постійних магнітів нижча, ніж магнітом'яких матеріалів, причому чим більша коерцитивна сила, тим менша магнітна проникність.

До магнітотвердих матеріалів також відносять леговані мартенситні сталі, литі магнітотверді сплави, магніти із порошків, фе-

рити, металічні і неметалічні матеріали для звукозапису, магнітні носії інформації.

Магніт у замкнутому стані, що має вигляд тороїду не віддає енергію в навколишнє середовище. Тобто, магнітний потік та магнітна індукція зосереджені всередині тороїду. Для віддачі магнітної енергії, що буде зв'язана з полем поза об'ємом кільцевого сердечника необхідно створити повітряний проміжок, як показано на рис.5.11. Величина енергії залежатиме від довжини зазору. Індукція в зазорі  $B_d$  буде меншою від залишкової індукції  $B_r$ , внаслідок розмагнічуючої дії полюсів (рис.5.12). Питома магнітна енергія у повітряному проміжку буде дорівнювати [3]:

$$W_d = \frac{B_d H_d}{2}, \quad (5.14)$$

де  $H_d$  – напруженість поля, що відповідає індукції  $B_d$ , А/м.

Чим менша довжина магніту і чим більший зазор, тим більше розмагнічуюче поле полюсів і менша індукція  $B_d$  в зазорі. Із рис.5.12 видно, що при деяких значеннях  $B'_d$  та  $H'_d$  енергія досягає свого максимального значення:

$$W_{d\max} = \frac{B'_d H'_d}{2}, \quad (5.15)$$

яке є найважливішою характеристикою якості матеріалів при виготовленні постійних магнітів.

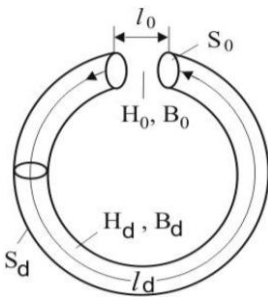


Рис.5.11. Магнітний тороїд з повітряним проміжком

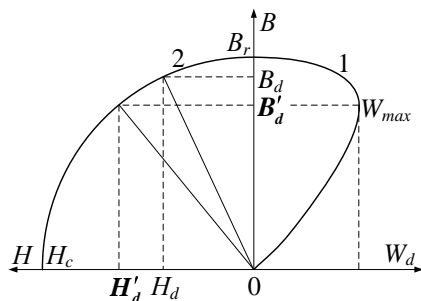


Рис.5.12. Криві розмагнічування (1) і магнітної енергії (2) у повітряному проміжку постійного магніту

При замкнутому магніті  $B_d = B_r$  і енергія дорівнює нулю, бо  $H_d = 0$ , а також при досить великому проміжку  $H_d = H_c$  енергія також прямує до нуля, бо  $B_d = 0$ .

Часто для характеристики магнітотвердих матеріалів користуються добутком  $B_d \cdot H_d$ , опускаючи множник  $1/2$ . Форму кривої розмагнічування характеризують коефіцієнтом опуклості [15]:

$$k_{on} = \frac{B \cdot H_{max}}{2B_r \cdot H_c}. \quad (5.16)$$

З наближенням петлі гістерезису до форми, що близька до прямокутної, коефіцієнт опуклості прямує до одиниці.

Магнітотверді матеріали за складом, станом й способом одержання підрозділяють на: 1) леговані мартенситні сталі, 2) литі магнітотверді сплави, 3) магніти з порошків, 4) магнітотверді ферити, 5) пластичні сплави, що деформуються і магнітні стрічки.

**Леговані мартенситні сталі** є найбільш простим і доступним матеріалом для виготовлення постійних магнітів. Для виробництва постійних магнітів деякий час застосовували леговані мартенситні сталі, через їх невисоку вартість і просту механічну обробку. Вони легуються домішками вольфраму, хрому, молібдену та ін. Значення  $W_{max}$  для мартенситних сталей лежить у межах  $1 \div 4$  мДж/см<sup>3</sup>. Потрібні магнітні властивості таких сталей забезпечуються після спеціальної термообробки.

Однак у зв'язку з їх низькими магнітними характеристиками їхнє застосування в наш час обмежене.

**Ливарні магнітотверді сплави.** До таких сплавів відносять ся сплави системи *Fe-Ni-Al* (альні-сплави). Найбільшою магнітною енергією володіють сплави, що містять приблизно 28% *Ni* і 14% *Al*. Для покращення структури і магнітних характеристик сплави додатково легують міддю, кремнієм і кобальтом. Особливо ефективне легування кобальтом, оскільки іони кобальту володіють магнітним моментом і домішка кобальту не тільки уповільнює дифузію, але й підвищує залишкову індукцію сплаву.

Сплави системи *Fe-Ni-Al-Cu-Co* отримали назву *альніко*. Для підвищення магнітних властивостей загартований сплав піддають термомагнітній обробці, тобто проводять нагрів для старіння в сильному магнітному полі. При цьому дисперсні частинки інтерметалідів виділяються по межах доменів і закріплюють вже зорієтова-

ні домени. Сплави, що пройшли термомагнітну обробку отримали назву *магніко*.

Вироби із сплавів системи *Fe-Ni-Al-Cu-Co* можна отримувати литтям або методами порошкової металургії. При литті важко отримувати вироби із строго витриманими розмірами. Крім того, після лиття необхідне тривале відпалювання, гомогенізація для отримання однорідності хімічного складу. У виробів, отриманих методами порошкової металургії коерцитивна сила практично така ж як і у литих, але залишкова індукція на 35÷50% нижча.

Покращення магнітних властивостей сплавів зумовлено не тільки складом, але й спеціальною обробкою – охолодженням магнітів у сильному магнітному полі.

Недоліками сплавів типу альні, альніко, магніко є складність в обробці, висока твердість, крихкість, внаслідок чого вони можуть оброблятися тільки шляхом шліфування.

Прикладами марок ливарних магнітотвердих сплавів є: ЮНД4 (альні), ЮНД12, ЮНДК15 (альніко), ЮНДК35Т5, ЮНДК24Б (магніко), ЮНДК25БА.

Для виготовлення постійних магнітів зі строго витриманими розмірами використовують методи порошкової металургії. Розрізняють металокерамічні магніти, які одержують пресуванням і подальшим спіканням за високої температури, й металопластичні магніти, які виготовляють із зерен порошку, скріплених зв'язуючими речовинами.

**Магнітно-тверді ферити.** З магнітотвердих феритів найбільш відомий барієвий ферит  $BaO \cdot 6Fe_2O_3$  (ФБ, фероксдюр). На відміну від магнітно-м'яких феритів він має не кубічні, а гексагональні грати з одновісною анізотропією. Висока коерцитивна сила обумовлена малим розміром зерен і сильною кристалографічною анізотропією. Крім барієвого фериту використовуються хромбарієвий ферит (ХБ) і кобальтовий ферит.

Технологія отримання магнітотвердих феритів у загальних рисах схожа на технологію отримання магнітно-м'яких феритів. Проте для отримання дрібнокристалічної структури, здійснюють дуже тонкий помел (як правило, у водному середовищі), а спікання проводять при невисоких температурах для уникнення зростання зерен. Для додання анізотропії магнітних властивостей матеріал текструють.



Для створення текстури дрібнозернисту масу поміщають в сильне магнітне поле, яке відключають тільки після формування виробу і його повного висихання. Бар'єві анізотропні ферити маркуються БА, хромобар'єві – ХБА, кобальтові КА. Ізотропні, не текстуровані магніти маркуються БІ, ХБІ і КІ відповідно.

Феритні матеріали значно дешевше металевих. Разом з тим, у них істотно нижча питома вага. Висока коерцитивна сила дає змогу виготовляти магніти з малим відношенням довжини до поперечного перерізу.

До недоліків магнітотвердих феритів слід віднести низьку механічну міцність, крихкість, високу чутливість до зміни температури. Крім того при охолодженні до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  і повторному нагріві вони втрачають феромагнітні властивості.

**Порошкові магніти.** Складність отримання високоточних дрібних магнітів складної форми зумовила застосування методів порошкової металургії для отримання постійних магнітів. Розрізняють два методи їх отримання: металокерамічний і металопластичний. У першому випадку процес отримання зводиться до пресування порошку, що представляє собою подрібнені тонкодисперсні магнітотверді сплави (альні, магніко), з подальшим спіканням при високих температурах, аналогічно процесам випалювання кераміки. Виготовлення другим способом аналогічно пресуванню виробів з пластмас. Зв'язувач і наповнювач з дисперсного магнітотвердого матеріалу пресуються при дуже високому питомому тиску.

Використання таких технологій доцільно у масовому автоматизованому виробництві. Однак магнітні характеристики таких магнітів у порівнянні з іншими невисокі.

Останнім часом знаходить поширення технологія отримання спечених магнітів на основі сплавів кобальту і рідкоземельних металів (наприклад: кобальт – самарій – празеодим). Вони мають високу коерцитивну силу та магнітну індукцію.

## **Контрольні запитання**

1. Наведіть класифікацію речовин за магнітними властивостями.
2. Перелічіть основні характеристики магнітних матеріалів.
3. Чим відрізняються діамагнетики від феромагнетиків?
4. Чим відрізняються феромагнетики від антиферомагнетиків?
5. У чому полягає суть явища феромагнетизму?
6. Перелічіть зовнішні фактори, що впливають на характеристики магнітних матеріалів.
7. Укажіть основні відмінності магнітом'яких матеріалів від магнітотвердих.
8. Опишіть методику визначення відносної магнітної проникності з основної кривої намагнічування.
9. Які причини появи магнітних втрат при перемагнічуванні феромагнетиків?
10. Перелічіть способи зменшення втрат на вихрові струми.
11. Поясніть, що називається коерцитивною силою.
12. Поясніть, що називається кривою намагнічування.
13. Поясніть, що називається залишковою індукцією.
14. Наведіть основні марки електротехнічних сталей.
15. Укажіть основні властивості пермалоїв.
16. Укажіть основні властивості альсиферів.
17. Поясніть, що мається на увазі під добротністю осердя.
18. Перелічіть основні властивості та технологію виготовлення магнітодіелектриків.
19. Які матеріали називають феритами? Назвіть області їх застосування.
20. Перелічіть назви литих магнітотвердих сплавів.

## РОЗДІЛ 6. РАДІОКОМПОНЕНТИ

### 6.1. Проводи та кабелі

Важливою частиною електроустановок, радіоапаратури, пристроїв передачі сигналів є електрична проводка. Сюди відносять силові електричні, обмотувальні та монтажні проводи, а також радіочастотні, коаксіальні, оптоволоконні кабелі та інші.

**Проводи електричні** – це неізольовані або ізольовані провідники електричного струму, що складаються з однієї (одножильний провід) або декількох (багатожильний провід) проволочок (найчастіше мідних, алюмінієвих або сталевих). Провід використовують при спорудженні ліній електропередач (ЛЕП), виготовленні обмоток електричних машин, монтажі радіоапаратури, у пристроях зв'язку тощо.

**Кабелем** називають пристрій, призначений для каналізації електроенергії, що складається з одного або кількох ізольованих один від одного провідників, вкладених у герметичну захисну оболонку з гуми, пластмаси, алюмінію або свинцю. Кабель, що має поверх захисної оболонки покриття (броню) із сталевих стрічок (для захисту від механічних пошкоджень), називається броньованим.

**Обмотувальні та монтажні проводи.** Обмотувальні проводи виготовляють із провідникових матеріалів із **малим опором** – обмотки котушок індуктивності, трансформаторів, реле, електричних машин та з **великим опором** – проволочні резистори, спіралі електронагрівальних приладів тощо.

Поверхня обмотувальних проводів покривається емальованою лакостійкою ізоляцією для уникнення міжвиткового замикання.

**Обмотувальні проводи з малим питомим опором.** Ці проводи, крім емальованої ізоляції, можуть мати ще додаткову волокнисту ізоляцію з шовку, бавовни, та капрону в один або два шари.

На високих частотах у котушках індуктивності застосовують провід, який отримав назву **літцендрат**. Це багатожильний провід особливістю якого є те, що кожна жила ізольована одна відносно одної лаком, що дає змогу зменшити втрати при скін-ефекті.

До літцендратів відносяться:

ЛЭШО, ЛЭШД – це літцендрат з емальованою ізоляцією жил, ізольований шовковою ізоляцією в один шар або у два шари відповідно (діаметр  $0,32 \div 3,8$  мм);

ЛЭПКО – літцендрат з емальованою ізоляцією жил, ізольо-

ваний поліамідним шовком та капроном в один шар.

ЛЭЛО – літцендрат з емальованою ізоляцією жил, ізольований лавсаном в один шар.

**Обмотувальні проводи з великим питомим опором.**

Існують такі основні марки проводів:

ПЭММ – емальований манганіновий м'який;

ПЭК – емальований константановий;

ПЭВНХ – емальований з високоміцною емаллю, ніхромовий.

**Монтажні проводи.** Використовуються для електричних з'єднань між выводами радіодеталей і блоків та інших електротехнічних пристроїв.

Застосовують жорсткі одножильні та гнучкі проводи, а також багатожильні з мідних тонких жил. Монтажні проводи мають поліхлорвініловану, гумову, бавовняну, шовкову, скловолоконну або фторопластову ізоляції.

Деякі проводи мають металеві екрани. Це сплетіння тонких мідних луджених проводів.

Найчастіше застосовують такі марки монтажних проводів:

МГВ – монтажний гнучкий у поліхлорвініловій ізоляції;

МГВЭ – провід МГВ з екраном;

МГВЛ – МГВ із бавовняної пряжі, лакований;

МГВЛЭ – провід МГВЛ з екраном;

МШВ – монтажний одножильний у шовковій та поліхлорвініловій ізоляції (діаметр  $0,8 \div 2,7$  мм);

МГШВ – монтажний гнучкий із шовковою та поліхлорвініловою ізоляцією (діаметр  $1,0 \div 2,9$  мм);

МГТФЭ – монтажний гнучкий фторопластовий в екрані;

МГВСЛ – монтажний гнучкий багатожильний з поліхлорвініловою ізоляцією, лакований в обплетенні із скловолокна (діаметр  $2,2 \div 2,6$  мм);

МГВСЛЭ – провід МГВСЛ із мідним екранним обплетенням (діаметр  $2,2 \div 2,6$  мм);

ПВЭ – провід монтажний з однією жилою та поліхлорвініловою ізоляцією;

ПМБГ – провід монтажний з бавовняною пряжею в поліхлорвініловій ізоляції, гнучкий (діаметр  $2,0 \div 2,6$  мм);

МР – монтажний провід з однією жилою в гумовій ізоляції.

Типи найбільш поширених обмотувальних, монтажних, установочних проводів наведено в табл. Дб.1-Дб.4 додатків.

**Силові кабелі.** Силові кабелі використовуються для передачі та розподілу енергії на постійному та змінному струмі. Силовий кабель складається зі струмопровідних жил, ізоляції, оболонки та захисного покриття. Основним матеріалом для виготовлення струмопровідних жил служать м'яка мідь або алюміній. Для збільшення гнучкості виготовляють багатопроволочні струмопровідні жили.

У якості ізоляції застосовують гуму, паперову просочену стрічку або синтетичні плівки. Кабелі з паперовою ізоляцією, крім ізоляцій окремих жил, мають спільну ізоляцію, яка накладається на скручені ізольовані жили. Поверх цього шару для захисту від вологи накладається свинцева або алюмінієва оболонка, а для деяких типів кабелів – гнучка гумова або полівінілхлоридна оболонка.

Кабелі з гумовою ізоляцією випускаються на мінімальну напругу: 660 В постійного струму; 3,6 та 10 кВ змінного струму. Номінальний переріз жили –  $1 \div 500 \text{ мм}^2$ .

**Мережеві кабелі** використовуються для підключення одного мережевого пристрою до інших пристроїв мережі або для з'єднання двох або більше персональних комп'ютерів, для мережевого ко-ристування периферійними пристроями тощо [15].

На практиці у більшості мереж застосовуються тільки три основні групи кабелів: вита пара, оптоволоконний кабель, ко-аксіальний кабель.

Різні типи вищезгаданих мережевих кабелів використовуються в залежності від топології і розміру мережі. Пристрої можуть бути розділені великими відстаннями (наприклад, через мережу *INTERNET*).

Кабель «*вита пара*» у найпростішому розумінні є системою двох обвитих один з одним ізольованих мідних проводів. Існує два типи витої пари: неекранована (*UTP*) та екранована (*STP*).

Якщо декілька груп витих пар помістити в захисну оболонку, то можна усунути завади, що наводяться сусідніми парами та іншим зовнішнім електрообладнанням. Це важливо при передачі ін-формації.

*Неекранована вита пара* складається з двох ізольованих мідних проводів. Існує декілька специфікацій, які регулюють кіль-кість витків на одиницю довжини залежно від призначення кабелю. Цей кабель поділяється на п'ять категорій. До першої з них відно-сять традиційний телефонний кабель кінця ХХ століття, яким мож-на передавати тільки звук, але не дані. Друга, третя, четверта та

п'ята категорії здатні передавати на відстані масиви даних відповідно з такими швидкостями – 4, 10, 16, 100 Мбіт/с.

Однією з проблем для будь-яких типів електричних кабелів є перехресні завади. Перехресні завади – це електричні наведення, викликані сигналами чи струмами у сусідніх проводах. Неекранована вита пара особливо чутлива до цих завад. Для зменшення їх впливу використовують екран.

Кабель *екранованої витої пари* має ззовні мідне обплетення, що забезпечує надійніший захист від завад. Крім того, всередині кабелю пара проводів обмотана фольгою. В результаті екранована вита пара захищає передавані дані від зовнішніх завад і може передавати дані з вищою швидкістю і на великі відстані.

*Радіочастотні (коаксіальні) кабелі* застосовуються на високих частотах для з'єднання антени з приймачем або передавачем, для міжблочного з'єднання, а також у пристроях узгодження.

Донедавна коаксіальний кабель вважався найпоширенішим типом кабелю. Він був недорогим, гнучким і зручним в застосуванні, надійним і простим в установці. Найпростіший коаксіальний кабель складається з мідної жили, ізоляції, екрану у вигляді металевого обплетення і зовнішньої оболонки. Якщо кабель, окрім металевого обплетення, має і шар фольги, він називається кабелем з подвійним екрануванням. На сьогодні існує два типи коаксіальних кабелів: тонкий коаксіальний кабель та товстий коаксіальний кабель. Вибір того або іншого типу кабелю залежить від потреб конкретної мережі.

Найчастіше у радіотехніці для передачі сигналів та інформації застосовується коаксіальний кабель типу РК (радіокабель). Його конструкцію в розрізі приведено на рис.6.1. Прикладом радіочастотного кабелю є коаксіальний кабель РК-75-4-13.

*Оптоволоконний кабель* розповсюджує цифрові дані оптичними волокнами у вигляді модульованих світлових імпульсів.

Це відносно захищений спосіб передачі, оскільки при ньому не використовуються електричні сигнали. Отже, до оптоволоконних кабелів на відміну від електричних неможливо підключитися, не пошкодивши їх. Тобто доступ до інформації неможливий.

На рис.6.1. показано зовнішній вигляд мережевих кабелів (а – неекранована вита пара, б – екранована вита пара, в – коаксіальний кабель, г – оптоволоконний кабель).

Крім жил та ізоляції може містити екран, силові елементи та інші конструктивні елементи.

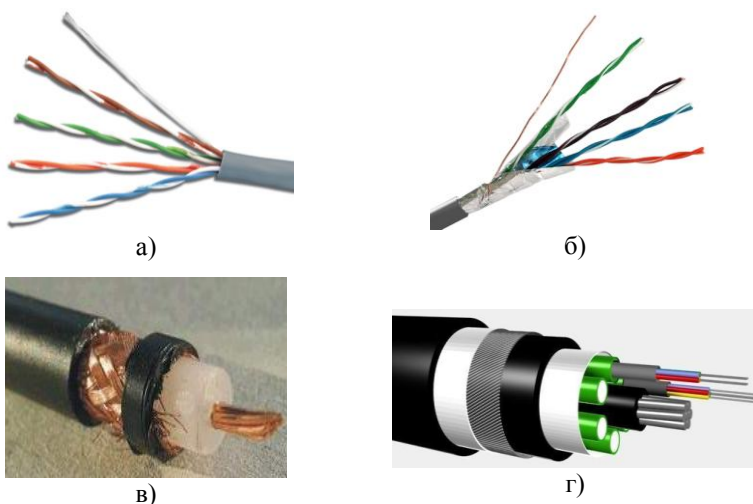


Рис.6.1. Загальний вигляд мережевих кабелів

Оптоволоконні лінії призначені для передачі великих масивів даних на дуже високих швидкостях, оскільки сигнал в них практично не затухає і не спотворюється.

Інформація маркування кольорів волокон в кабелі, їх типи нестандартизована і вказується виробниками в його паспорті.

## 6.2. Резистори

### 6.2.1. Загальні відомості про резистори та їх класифікація

Резистори є одними з основних пасивних монтажних елементів радіоелектронної апаратури. Тому вивчення основних параметрів, властивостей та типів резисторів є необхідним для розуміння процесів, які протікають в електричних та електронних колах.

Конструкцію резистора показано на рис.6.2.

На діелектричній основі розміщується струмопровідний шар резистивного матеріалу. З обох боків основи закріплюють ковпачки з виводами. З метою збільшення опору на струмопровідному шарі резистора роблять спіральну канавку.

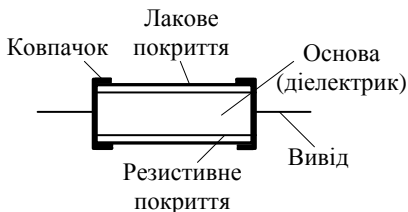


Рис.6.2. Типова конструкція плівкового резистора постійного опору

Резистори призначені для регулювання та розподілу струму між електричними колами та їх елементами.

Основу резистора виготовляють з кераміки, скла, пластмаси та інших діелектричних матеріалів, які мають малі діелектричні втрати, велику міцність та теплостійкість.

Резистори класифікуються за різними ознаками. За можливістю регулювання величини опору у процесі експлуатації резистори розподіляють на постійні та змінні, а також на:

- резистори загального застосування (резистори навантаження, дільники напруги тощо);
- прицезійні (у вимірювальних точних приладах, в обчислювальній техніці і автоматиці);
- високочастотні (у високочастотних підсилювачах, генераторах, хвилеводах, антенах)
- високовольтні (в колах високої напруги);
- високомегаомні (у приладах нічного бачення, дозиметрах, вимірювальних приладах).

За резистивним провідниковим матеріалом – на проволочні та непроволочні. Непроволочні можуть бути композиційними, металодіелектричними та металооксидними, а також виготовлені з вуглецю.

За потужністю розсіювання – потужні та малопотужні.

За типом вольт-амперної характеристики – лінійні та нелінійні.

### **6.2.2. Параметри резисторів постійного та змінного опору**

**Номинальний опір резистора (номинал)  $R_{ном}$**  – це значення електричного опору, яке відповідає нормативній документації і маркується на його корпусі. Номинальний опір зазвичай вказується на електричних схемах і разом із позиційним позначенням резистора. Він вимірюється в Ом або кратних йому одиницях: кілоомах – кОм ( $10^3$  Ом), мегаомах – МОм ( $10^6$  Ом).

Значення номіналів резисторів розбиваються на декади і у межах кожної декади розділені стандартизованими рядами номіналів, які позначаються кодом E3, E12, E24, E48, E96, E192.

Кожна шкала є дискретним рядом послідовних чисел, які зростають (табл.6.1). Число у позначенні шкали відповідає кількості номіналів у ряду.



Для того, щоб знайти всі значення номінальних опорів резисторів, треба кожне число ряду помножити на  $10^n$ , де  $n$  – ціле додатне або від'ємне число.

**Допуск** характеризує відхилення фактичного опору резистора від номіналу. Це відхилення пов'язано з похибками при виготовленні резисторів.

Допуск або клас точності – це максимальна різниця між фактичним опором резистора, який вимірюється за допомогою вимірних приладів і номіналом у відсотках.

Основні шкали та ряди номінальних опорів резисторів показано в таблиці 6.1.

Табл.6.1

E6 $\Delta R = \pm 20\%$	E12 $\Delta R = \pm 10\%$	E24 $\Delta R = \pm 5\%$
1,0	1,0	1,0
		1,1
	1,2	1,2
		1,3
1,5	1,5	1,5
		1,6
	1,8	1,8
		2,0
2,2	2,2	2,2
		2,4
	2,7	2,7
		3,0
3,3	3,3	3,3
		3,6
	3,9	3,9
		4,3
4,7	4,7	4,7
		5,1
	5,6	5,6
		6,2
6,8	6,8	6,8
		7,5
	8,2	8,2
		9,1

Допуски стандартизовані. Їх значення найчастіше знаходяться в межах від  $\pm 0,1\%$  (для прицезійних резисторів) до  $\pm 20\%$  і мар-

кується на корпусі резистора цифрами або літерами.

Кількість значень опорів резисторів у ряді номіналів залежить від допуску. Чим менший допуск, тим більше номіналів і навіпаки.

У таблиці 6.2 показаний буквенний код відхилення опору резистора від номінального значення, що наноситься на корпус резистора.

Табл.6.2.

Відхилення опору $\Delta R$ від $R_{\text{ном}}$ в %	Позначення буквою	Відхилення опору $\Delta R$ від $R_{\text{ном}}$ в %	Позначення буквою
$\pm 0,1$	<i>B</i>	$\pm 2$	<i>G</i>
$\pm 0,25$	<i>C</i>	$\pm 5$	<i>J</i>
$\pm 0,5$	<i>D</i>	$\pm 10$	<i>K</i>
$\pm 1,0$	<i>F</i>	$\pm 20$	<i>M</i>

**Номінальна потужність розсіювання.** Електрична енергія, що надходить до резистора, перетворюється в ньому у теплову та розсіюється. Найбільша потужність, яку може розсіювати резистор при заданих умовах протягом гарантійного терміну служби при збереженні параметрів в установлених межах називають *номінальною потужністю розсіювання  $P_{\text{ном}}$* .

Фактична потужність розсіювання резистора залежить від температури навколишнього середовища та електричного навантаження, тобто від температури нагріву корпусу резистора.

Стандартом встановлюються такі діапазони номінальної потужності розсіювання: 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 5; 8; 10; 16; 20; 25; 40; 50; 75; 100 Вт. Найчастіше зустрічаються резистори з номінальними потужностями 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2 та 5 Вт.

На принципових електричних схемах резистор позначається прямокутником, в середині якого знаходиться риска, яка вказує на номінальну потужність розсіювання (рис.6.3).

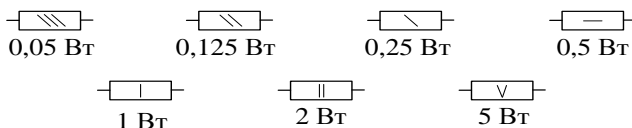


Рис.6.3. Умовні позначення номінальної потужності розсіювання резисторів на принципових електричних схемах

**Температурний коефіцієнт опору (ТКО)** – це відносна зміна опору резистора при зміні температури навколишнього середовища на 1 °С. Резистори можуть мати додатній або від’ємний ТКО. Чим менший ТКО, тим температурна стабільність резистора вища.

**Найбільша робоча напруга.** Для кожного типу резистора з урахуванням його конструкції, розмірів, застосованих матеріалів та забезпечення тривалої працездатності встановлюється значення робочої напруги, перевищувати яку не можна. Це найбільша напруга, яка обмежується тепловими процесами у струмопровідному шарі резистора та електричною міцністю його ізоляції.

### 6.2.3. Різновиди постійних резисторів

**Металоплівкові резистори.** Провідний шар у металоплівкових резисторах – тонкі плівки спеціальних сплавів або металів, що осаджуються на ізоляційну основу. Основа резистора – це трубка із керамічних мас оксидів металів  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $BrO$  і ін. Металоплівкові резистори мають ряд позитивних властивостей: висока термостійкість, низький рівень власних шумів, хороші частотні характеристики. Суттєвий недолік металоплівкових резисторів – низька стійкість до імпульсних навантажень. На мікронеоднорідностях провідної плівки виникає локальний перегрів, що може призвести до руйнування провідного шару.

На рис.6.4. показано загальний вигляд постійних резисторів різних марок і номіналів.

Метал при температурі 1000 °С у вакуумній електропечі переводиться у пароподібний стан і надалі осаджується на основу резистора – керамічну або скляну циліндричну трубку з наскрізним отвором відповідного діаметру.

Крім розглянутого методу одержання металевих плівок використовують ще такі: катодне розпилення парів металів, електрохімічне (хімічне) осадження, спікання, занурення у розплав та інші.



Рис.6.4. Загальний вигляд резисторів постійного опору

Основні типи резисторів:

- МЛТ – металоплівкові, лаковані, теплостійкі;
- МЛТ – металоплівкові, підвищеної надійності;
- МТ – металоплівкові, теплостійкі;
- МУН – металоплівкові, ультрависокочастотні, незахищені.

**Металооксидні резистори.** Властивості металооксидних резисторів близькі до металоплівкових. Провідний шар отримують осаджуванням на керамічну або скляну основу двооксиду олова шляхом термічного розкладу хлористого олова  $SnCl_2$  при температурі 450 °С. В результаті реакції з водою утворюється пар  $SnO_2$ , який осаджується на поверхню заготовки резистора. Змінюючи умови процесу та використовуючи різноманітні домішки, наприклад, цинк ( $Zn$ ) або оксид цинку ( $ZnO$ ) можна в широких межах змінювати величину опору плівок з високою термостабільністю.

Основні типи металооксидних резисторів:

- МОН – металооксидні, низькоомні;
- С2 – металооксидні;

**Композиційні резистори.** Струмopовідний елемент композиційних резисторів – це сполуки графіту або сажі з органічними або неорганічними зв'язуючими. Такі сполуки дають змогу набуту провідним елементам різної форми у вигляді масивного тіла, або плівки. Характеризуються надійністю в роботі. Основними недоліками композиційних резисторів є: залежність величини опору від прикладеної напруги, високий рівень власних шумів, залежність величини опору від частоти.

Основні типи резисторів:

а) Композиційні об'ємні:

- С4-1 – підвищеної теплостійкості;
- ТВО – теплостійкі, вологостійкі, об'ємні;
- КОИ – композиційні, з органічною зв'язкою;

б) Композиційні плівкові:

- КЛМ – композиційні, лаковані, малогабаритні;
- КВМ – композиційні, вакуумні (в балоні зі скла);
- КЕВ – композиційні, екрановані, високовольтні;
- С4 – композиційні, термостійкі (до 350 °С), об'ємні.

Резистори КЛМ, КВМ, КЕВ та їх підтипи можуть бути високоомними (МОм, ГОм) та високовольтними (до 60 кВ).

**Проволочні резистори.** Провідний елемент проволочних резисторів – це тонкий провід з високоомного сплаву. Провід закріплюється на ізольованому керамічному каркасі.

Властивості резисторів визначаються властивостями металів, що входять до складу сплаву. Сюди відносять резистори на основі манганіну, константану ніхрому та ін.

Основні типи таких резисторів:

ПКВ – постійний, на керамічній основі, вологостійкий;

ПТ – постійний, точний;

ПТМН – постійний, багатошаровий, малогабаритний, ніхромовий;

ПТМК – постійний, багатошаровий, малогабаритний, константановий;

ПЕВ – постійний, емальований, трубчастий, вологостійкий;

ПЕВР – постійний, емальований, вологостійкий, регульований.

#### 6.2.4. Різновиди змінних резисторів

У телерадіоапаратурі як регулятори гучності, яскравості, контрастності, частоти кадрів та інших цілей використовують змінні резистори загального призначення. Крім цього, ці резистори служать регуляторами параметрів в електричних колах, що залежать від струму або напруги.

До них висуваються вимоги щодо зручності використання, плавності зміни опору по тому чи іншому закону, надійності та швидкої заміни під час ремонту.

На рис.6.5, 6.6 показано загальний вигляд і конструкцію резисторів змінного опору.



Рис.6.5. Загальний вигляд резисторів змінних

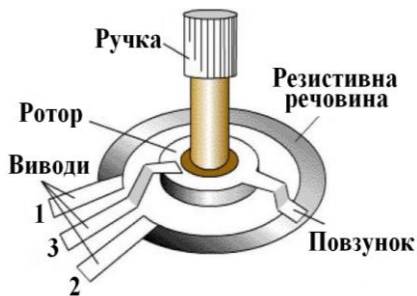


Рис.6.6. Конструкція змінного резистора

**Непроволочні змінні резистори** використовуються для регулювання електричних величин в електричних та електронних колах.

Різновиди резисторів змінних непроволочних:

СП – резистор змінний, лакоплівковий;

СПО – резистор змінний, об'ємний;

СПО-Е – резистор змінний, підвищеної довговічності;

СПЗ – резистор змінний, для друкованого монтажу;

ВК, ТК – резистори змінні, одинарні (здвоєні) з вимикачем та ТКД, СНК без нього, у звичайному та тропічному виконанні.

Резистори типу СП, змінні композиційні, складаються з таких конструктивних елементів: основа – пластинка з пластмаси у вигляді підковки, провідного елемента – композиційна плівка, ковзаючого контакту, рухомою системою з віссю, кришки з листової сталі або латуні.

За конструкцією резистори СП діляться на підтипи: СП-I одинарний, СП-II одинарний зі стопором осі, СП-III, СП-IV здвоєні резистори (два резистори на одній осі).

**Резистори змінні проволочні.** В таких резисторах провід (константан, ніхром) намотується на каркас з кераміки або пластмас. Каркаси виготовляються у вигляді тороїдів, трубок круглого, квадратного, прямокутного перерізу. Конструкція рухомої частини подібна до змінних непроволочних резисторів. Переміщення рухомого контакту може бути прямолінійним або круговим.

Основні типи змінних резисторів: СП-5 – резистори змінні низькочастотні для навісного монтажу; ППЗ – резистори змінні одинарні (здвоєні); РП-25, РП-80 – резистори змінні, потужні (25, 80 Вт).

### **6.2.5. Маркування та позначення резисторів**

Маркування резистора, яке виконується на його корпусі, найчастіше, складається з таких елементів: тип резистора, номінальна потужність, номінальний опір та допуск.

Інколи номінали та допуски маркуються на корпусі спеціальним літерно-цифровим кодом. Перші три знаки цього коду позначають номінал (літери *E, K, M, G*) відповідають одиницям вимірювання: Ом, кОм, МОм, ГОм відповідно. Ці літери розміщуються після номіналу або замість коми. Четвертий знак коду (літера) – відповідає допуску.

Якщо опір резистора виражається цілим числом, то букву розміщують після цифри (12 R, 4 E, 47 КОм, 47 к, 0,33 М і т. д.).

Якщо опір резистору ціле число з десятковим дробом, то замість коми записується буква (1,2 Ом – 1R2; 4,7 кОм – 4K7; 3,9 МОм – 3M9).

Для резисторів з опорами менше ніж 1 Ом букву *R* або *E* записують перед цифрою (0,56 Ом – E56, R56).

У таблиці 6.3 подані приклади скороченого запису величини опору резисторів на схемах або маркування на самих резисторах.

Маркування резисторів може бути і кодом у вигляді кольорових кілець або смуг, які наносяться на корпус резистора біля одного із його виводів.

Табл.6.3

Одиниці	Позначення буквою	Діапазон $R_{ном}$	Скорочене позначення	Відповідне значення
Ом	E, R	0÷999	E56; 1R5; R18; 18R.	0,56 Ом; 1,5 Ом; 0,18 Ом; 18 Ом.
КілоОм	K	1÷999	1,0; κ12; 4κ7.	1,0; 0,12; 4,7 кОм.
МегаОм	M	1÷999	M68; 6M8.	680 кОм; 6,8 МОм.
ГігаОм	Г (G)	1÷999	Г39; 3G9.	390 МОм; 3,9 ГОм.

Якщо розміри резистора не дають змоги розмістити код ближче до одного виводу, то площа останнього знаку мусить бути в 1,5÷2 рази більше площі інших знаків.

Перші два кільця визначають номінальний опір в Омах, наступне кільце визначає множник, а останнє – допуск (табл.6.4). При допуску ±20% четверте кільце не маркується.

Приклад кольорового маркування резистора 56 кОм ±1 % наведено на рис.6.7.

Кольори знаків маркування величини опору, множника та допуску повинні відповідати цифрам, що показані в таблиці 6.4.

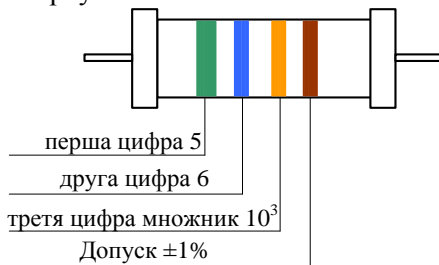


Рис.6.7. Приклад маркування резистора

Табл.6.4.

Колір знаку маркування	Номінальний опір резистору, Ом				допуск, %
	перша цифра	друга цифра	третья цифра	множник	
Чорний	—	0	—	1	—
Коричневий	1	1	1	10	± 1
Червоний	2	2	2	10 <sup>2</sup>	± 2
Оранжевий	3	3	3	10 <sup>3</sup>	—
Жовтий	4	4	4	10 <sup>4</sup>	—
Зелений	5	5	5	10 <sup>5</sup>	± 0,5
Блакитний	6	6	6	10 <sup>6</sup>	± 0,2
Фіолетовий	7	7	7	10 <sup>7</sup>	± 0,1
Сірий	8	8	8	10 <sup>8</sup>	± 0,05
Білий	9	9	9	10 <sup>9</sup>	—

Резистори постійного та змінного опорів відносяться до елементів підвищеної надійності: середня інтенсивність їх відмов відповідно дорівнює  $10^6 \text{ год}^{-1}$  та  $10^5 \text{ год}^{-1}$ .

### 6.2.6. Терморезистори

Терморезистор – це лінійний або нелінійний резистор, опір якого значно залежить від температури. Таку властивість мають і метали і напівпровідники.

Терморезистори з платини, міді та інших металів виготовляють у формі проводу діаметром  $0,04 \div 0,08$  мм намотаного на ізоляційний каркас і поміщеного у герметичний корпус. Такі терморезистори мають невеликий температурний коефіцієнт опору ( $0,5 \% / K$ ) і значні габаритні розміри.



Рис.6.8. Загальний вигляд та позначення фоторезисторів, терморезисторів та варисторів



Терморезистори на основі напівпровідників мають досить великий опір, у порівнянні з металевими, менші габаритні розміри, більший ТКО, простіші у конструкції та надійніші в експлуатації.

Для виготовлення терморезисторів застосовують оксидні напівпровідники  $MnO_4$ ,  $Co_3O_4$ ,  $SiO$ , кобальтово-марганцеві, мідно-марганцеві та інші.

Терморезистори застосовуються для вимірювання і регулювання температури, температурної компенсації деяких елементів електричних кіл, у схемах стабілізації напруги, рівнів сигналу на виході підсилювачів тощо. Їх поділяють на такі групи:

- 1) терморезистори для вимірювання і регулювання температури;
- 2) термокомпенсатори;
- 3) терморезистори для теплового контролю;
- 4) терморезистори для стабілізації напруги;
- 5) вимірювальні терморезистори.

Конструктивно робочий елемент терморезистора виконується у вигляді пластин, стержнів, трубок, кульок або проводу для металевих терморезисторів. Робочий елемент захищається вологостійким покриттям.

Маркування терморезисторів визначається матеріалом робочого тіла, параметрами та особливостями конструкції, наприклад:

КМТ – кобальтово-марганцевий терморезистор;

ММТ – мідно-марганцевий терморезистор;

СТ1-21 – резистор термостерований;

ТКП – терморезистор з непрямим підігрівом;

ТКПМ – терморезистор з непрямим підігрівом, малогабаритний, матеріалом служать оксиди титану, ванадію, заліза.

При розробці схем з використанням терморезисторів слід урахувати не тільки їх вольт-амперні характеристики, але й побічні залежності інших елементів.

### 6.2.7. Варистори

**Варистори** – це напівпровідникові (металооксидні, оксидно-цинкові) нелінійні резистори, що характеризуються властивістю різко зменшувати свій опір на 6 – 9 порядків (зі стану ізолятора до стану провідника) при збільшенні на них прикладеної напруги вище порогового значення.

Залежність опору від напруги спостерігається у оксидів і сульфідів металів, карбіду кремнію та інших складних сполук.

На вольт-амперній характеристиці варистора (рис.6.9) можна виділити три характерних ділянки: 1) малих струмів; 2) середніх струмів і 3) великих струмів. Область малих струмів – це робота варистора під робочою напругою, що не перевищує найбільшу допустиму робочу напругу.

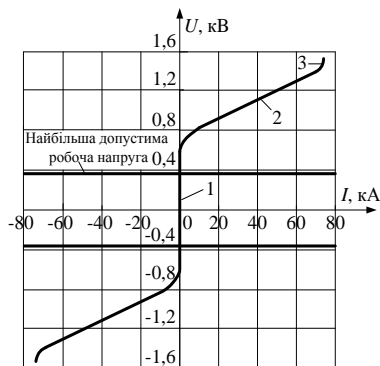


Рис.6.9. ВАХ варистора

Оскільки ВАХ варистора є симетричною, то він може застосовуватись і в колах змінного струму.

Варистори під'єднують паралельно до навантаження. При появі імпульсів напруг варистор різко зменшує свій опір до десятків долей Ом і шунтує навантаження. В цьому випадку через варистор короткочасно протікає дуже великий струм. Таким чином ввімкнення варистора паралельно навантаженню не впливає на його роботу в нормальних умовах, але зрізує піки напруг і отже, захищає електрообладнання. Вони є елементами багатократної дії і швидко відновлюють свій високий опір після зняття напруги.

Важливою характеристикою варисторів є допустима потужність розсіяння, що в основному визначається геометричними розмірами і конструкцією виводів варистора.

Для виготовлення варисторів найчастіше використовують карбід кремнію  $SiC$ . Як зв'язуюче застосовують кераміку, рідке скло, лаки та інші матеріали.

Маркування варисторів розшифровується таким чином: СН – опір нелінійний, перша цифра означає матеріал (1 – карбід кремнію, 2 – селен); друга цифра – тип конструкції (1, 8 – стержневий, 2, 6, 7, 10 – дисковий, 3 – мікромодульний); третя – порядковий номер розробки; далі вказується напруга у вольтгах і його похибка.

Наприклад: варистор марки СН1-1-1-820 10% означає, що опір нелінійний з карбіду кремнію стержневого типу першої розробки, розрахований на напругу 820 В з похибкою  $\pm 10\%$ .

Робоча область варистора складається з полікристалів карбїду кремнію або іншого напівпровідника, розділених діелектриком. На рис.6.10. показано: 1 – електроди, 2 – карбїд кремнію, 3 – зв’язуючий матеріал.

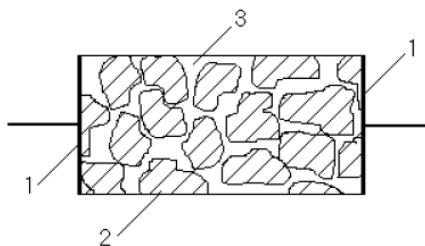


Рис.6.10. Внутрішня будова варистора

Під дією прикладеної напруги у місцях стикування карбїду кремнію або в оксидних плівках на поверхні зерен розвиваються ефекти лавинного чи тунельного пробоїв.

Отже, основним призначенням варисторів є захист елементів електричних та електронних кіл постійного та змінного струмів від перенапруг і пробоїв. Варистори застосовують також для стабілізації і регулювання кіл радіоелектронної апаратури.

## 6.3. Конденсатори

### 6.3.1. Загальні відомості та класифікація конденсаторів

Конденсатор – це елемент електричного кола, що складається з двох металевих обкладок, між якими розміщено діелектрик. Його основне призначення – накопичення електричної енергії або заряду. Конденсатори як і резистори відносять до пасивних елементів радіоелектронної апаратури.

Ємність конденсатора – це відношення заряду конденсатора до його напруги на обкладках, що наводить цей заряд  $C = q/U$ .

Одиницею вимірювання ємності прийнято розмірність фараду (Ф) та її похідні – мілі- ( $10^{-3}$ ), мікро- ( $10^{-6}$ ), нано- ( $10^{-9}$ ), пікофаради ( $10^{-12}$ ), як такі, що використовуються на практиці.

Конденсатори можуть використовуватись у силових електротехнічних установках, в основному для компенсації реактивної потужності в електричних мережах, а також в електронних та радіотехнічних пристроях (коливальні контури, електричні фільтри).

На рис.6.11 показано основні типи конструктивного виконання конденсаторів:

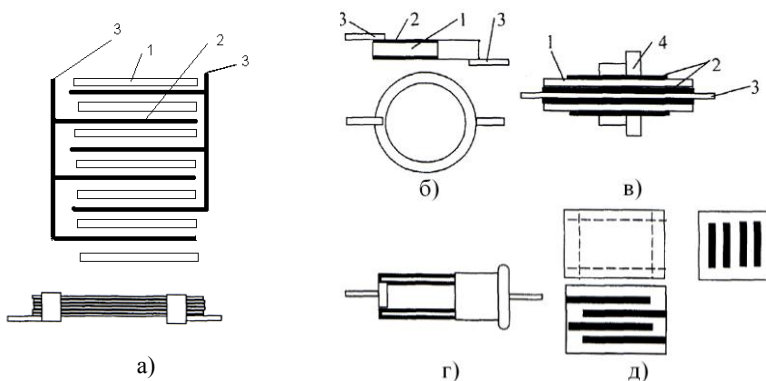


Рис.6.11. Основні типи конструктивного виконання конденсаторів:  
 а – пакетний; б – дисковий; в – трубчатий спеціальний; г – трубчатий;  
 д – литий секційний (1 – діелектрик; 2 – обкладки; 3 – виводи;  
 4 – металева втулка з різьбою)

Конденсатори класифікуються за такими ознаками:

- за можливістю регулювання ємності (постійні, змінні);
- за залежністю ємності від напруги та температури (лінійні та нелінійні);
- за матеріалом діелектрика (органічні, неорганічні, оксидні, та газоподібні);
- за областями застосування (низьковольтні, високовольтні, низькочастотні, високочастотні, імпульсні, полярні, неполярні та інші);
- за конструктивним виготовленням (пакетні, дискові, багатопластинчаті, литі секційні, трубчаті, рулонні, тощо);
- за фазовим станом діелектрика (газоподібні, рідкі, тверді);

### 6.3.2. Параметри конденсаторів

Основними параметрами конденсаторів є: номінальна ємність конденсатора  $C_{\text{ном}}$ , номінальна робоча напруга  $U_{\text{ном}}$ , температурний коефіцієнт ємності ТКЄ, опір ізоляції конденсатора  $R_{\text{із}}$ , втрати енергії в конденсаторі  $tg\delta$ .

**Номінальна ємність  $C_{\text{ном}}$**  – величина ємності, що позначена на корпусі конденсатора у відповідних одиницях вимірювання чи вказана в його паспорті. Номінальні значення ємностей стандартизовані і вибираються, подібно до резисторів (див.табл.6.1.) з таких рядів чисел, а саме Е3, Е6, Е12, Е24, Е48, Е96, Е192, найбільш вживані з яких Е6, Е12, Е24.

У таблиці 6.5 показано буквене позначення допуску (відхилення від номіналу) ємностей конденсаторів.

Табл.6.5.

Допустиме відхилення від номіналу $\Delta C$ , в %	Буква коду	Допустиме відхилення $\Delta C$ (керамічні, оксидні конденсатори), в %	Буква коду
$\pm 0,1$	B	- 10...+ 30	Q
$\pm 0,25$	C	- 10...+ 50	T
$\pm 0,5$	D	- 10...+ 100	Y
$\pm 1,0$	F	- 20...+ 50	S
$\pm 2,0$	G	- 20...+ 80	Z
$\pm 5,0$	J		
$\pm 10,0$	K		
$\pm 20,0$	M		

**Номінальна напруга  $U_{\text{ном}}$**  – це максимально допустима напруга, при якій конденсатор може працювати надійно та довготривало. Якщо конденсатор працює в колі змінного струму, то максимально діюча напруга повинна бути в 2 рази меншою за робочу напругу при постійному струмі.

Номінальна напруга встановлюється з необхідним запасом за електричною міцністю діелектрика, що унеможливує виникнення протягом терміну служби процесів старіння ізоляції, які в свою чергу погіршують електричні властивості конденсатора.

У таблиці 6.6 показано маркування конденсаторів за номінальною напругою.

Табл.6.6.

$U_{\text{ном}}$ , В	6,3	10	16	20	25	32	40	50	63	80
Код	B	D	E	F	G	H	S	J	K	L
$U_{\text{ном}}$ , В	100	125	160	200	250	315	350	400	450	500
Код	N	O	Q	Z	W	X	T	Y	U	V

**Температурний коефіцієнт ємності (ТКС)** – параметр, що визначає температурну стабільність ємності конденсаторів і знаходиться із виразу:

$$TKC = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT}.$$

Цей коефіцієнт показує на яку величину змінюється ємність при відхиленні температури на  $1^\circ\text{C}$ .

При маркуванні конденсаторів на корпусі крім значення  $C_{\text{ном}}$  та відхилення від номіналу –  $\Delta C$  (вираженого буквою, табл.6.5), може бути нанесений, подібно до коду номінальної робочої напруги (табл.6.6), буквенний код групи по ТКС (таблиця 6.7).

Табл.6.7.

Група по ТКС	П100	П60	П33	МПО	М33	М47	М75	М150	М220	М330
Код	A	G	N	C	H	M	L	P	R	S
Група по ТКС	M750	M1300	M2200	M3300	H10	H20	H30	H50	H70	H90
Код	U	V	K	Y	B	Z	D	X	E	F

**Опір ізоляції  $R_{ib}$**  – параметр, що характеризує якість діелектрика у конденсаторі і струм витікання через нього. Цей параметр характерний для органічних і неорганічних діелектриків.

Опір ізоляції для конденсаторів великої ємності обернено-пропорційний площі обкладок або ємності конденсатора. Часто на практиці замість опору ізоляції приводять значення постійної часу конденсатора, що дорівнює добутку опору ізоляції на ємність і виражається в секундах (МОм·мкФ). З часом опір ізоляції може зменшитись навіть у сто і більше разів.

**Реактивна потужність  $P_q$**  – параметр, що регламентується для керамічних та слюдяних конденсаторів, які використовуються, в основному, для коливних систем радіопередавачів.

$$P_q = U^2 \cdot \omega C = \frac{U^2}{X_c}. \quad (6.1)$$

**Втрати енергії у конденсаторі**, що працює в колі змінного струму, характеризують тангенсом кута діелектричних втрат  $tg\delta$ , (див. розділ 1). Величина обернена до  $tg\delta$  називається *добротністю* конденсатора.

### 6.3.3. Різновиди конденсаторів

У колах постійного, пульсуючого та змінного струмів застосовують конденсатори великих номінальних ємностей. Такими конденсаторами є паперові, металопаперові, плівкові та електролітичні.

**Паперові конденсатори** володіють підвищеною питомою ємністю із-за малої товщини діелектрика (до 5 мкм) та високими робочими напругами, відносно стійкі до підвищених температур та прості у виготовленні. Однак характеризуються великими втратами у колах змінного струму, а тому їх бажано використовувати при частотах до 500 Гц.

Обкладками в таких конденсаторах є металева стрічка, а діелектриком – спеціальний конденсаторний папір, просочений ізолювальними речовинами (вазелін, конденсаторне масло та ін.).

**Металопаперові та металоплівкові** конденсатори характеризуються ще більшою питомою ємністю, оскільки їх виготовляють з металізованого паперу з дуже тонким до 1 мкм шаром металізації. Діелектриком в цих конденсаторах є також конденсаторний папір або органічні плівки. Вказані конденсатори мають властивість до самовідновлення у випадку пробою діелектрика при перенапругах. На рис.6.12 показано загальний вигляд деяких конденсаторів.



Рис.6.12. Загальний вигляд деяких конденсаторів

Основними недоліками паперових, металопаперових конденсаторів є великі втрати і невисока стабільність ємності (до  $\pm 20\%$ ). Крім цього, майже всі вони потребують просочення і герметизації корпусів. Електрична міцність та опір ізоляції металопаперових конденсаторів з часом суттєво понижуються.

У **плівкових конденсаторах** в якості діелектрика використовуються неполярні плівки з полістиролу і фторопласту, а також по-

лярні із лавсану. Товщина плівок зазвичай лежить у межах  $20\div 30$  мкм. Характеризуються високим електричним опором ізоляції, малим  $tg\delta$ , що не залежить від частоти, високою температурною стабільністю ємності і можуть працювати на частотах  $10^5\div 10^7$  Гц. Обкладки таких конденсаторів виконують з фольги або напильюють на діелектрик.

Найбільшу питому ємність серед конденсаторів цієї групи мають лакоплівкові конденсатори, які можуть замінити навіть конденсатори з оксидним діелектриком при підвищених значеннях змінної напруги. Високі параметри в діапазоні середніх частот  $500\div 2000$  Гц мають плівкові полікарбонатні конденсатори (К77-1, К77-2, К77-3, К77-4, К77-5).

На більш високих частотах працюють плівкові полістирольні, фторопластові та поліпропіленові конденсатори.

**Електролітичні та оксидно-напівпровідникові конденсатори** використовуються для роботи в діапазоні звукових частот, а також для фільтрації випрямлених напруг, де необхідні великі ємності. На відміну від інших типів електролітичні конденсатори є полярними. Це означає, що їх можна вмикати тільки в кола постійної чи пульсуючої напруги і тільки в тій полярності, що вказана на його корпусі. Невиконання цієї умови призводить до пробію оксидного шару і виходу з ладу конденсатора, що часто супроводжується його вибухом.

Такі конденсатори поділяються наступним чином:

- оксидно-електролітичні алюмінієві конденсатори (К-50);
- об'ємно-пористі танталові конденсатори (К-52);
- оксидно-напівпровідникові конденсатори (К-53).

У конденсаторах з оксидним діелектриком одним електродом (анодом) є метал (алюміній, тантал, ніобій), а другим електродом (катодом) – електроліт. Між металом та електролітом виникає оксидна плівка, яка і є робочим діелектриком. В оксидно-напівпровідникових конденсаторах між електродами розміщують напівпровідник (оксид марганцю  $MnO_2$ ).

Оксидний шар між електродами має невелику товщину (доли мкм), але високу пористість, а тому й великі площу та діелектричну проникність ( $\epsilon = 10\div 100$ ). Це дає змогу створювати конденсатори з великим значенням ємності (від 0,5 до 5000 мкФ).

Однак наявність у оксидних конденсаторах електроліту, який має більший питомий опір, ніж металеві електроди, призводить до підвищених втрат. Крім того, оксидні конденсатори мають низький



температурний та частотний діапазони, а також низьку стабільність параметрів в часі завдяки висиханню електроліту.

У залежності від матеріалу анода, конденсатори з оксидним діелектриком, поділяють на алюмінієві, танталові та ніобієві. Танталові та ніобієві конденсатори мають велику питому ємність, оскільки оксидний шар на танталі та ніобії має більшу діелектричну проникність і електричну міцність, а велика хімічна стійкість танталу та ніобію дає змогу застосовувати дещо інші електроліти, які мають малий питомий опір, що призведе до зменшення втрат і покращення стабілізації параметрів конденсаторів

Керамічні, слюдяні, склокерамічні конденсатори є як правило високочастотні і мають незначні втрати в діелектрику, характеризуються високою стабільністю ємності ( $10^{-5}$   $1/^\circ\text{C}$ ) і точністю (до  $\pm 2\%$ ), малими габаритами та масою. Їх застосовують у схемах генераторів та підсилювачів високих і надвисоких частот.

**Слюдяні та керамічні конденсатори.** У слюдяних конденсаторах діелектрик – слюда. Обкладки виготовлені із фольги алюмінію чи срібла, фольгу наносять безпосередньо на пластинки слюди. Конденсатори мають додатній ТКС.

Керамічні конденсатори мають високу ємність при невеликих розмірах і можуть працювати в широкому інтервалі температур. Конденсатор представляє собою керамічну пластинку або трубку, на поверхню яких наносять тонку плівку із срібла.

Розрізняють кераміку високочастотну (ВЧ) та низькочастотну (НЧ). Ємність ВЧ-кераміки лінійно змінюється при зміні температури, в НЧ-кераміці – нелінійно. Керамічні конденсатори крім маркування за ТКС, мають різні кольори покриття фарбою. Так, наприклад, конденсатори синього, блакитного, сірого кольору називаються *термостабільними*, тобто ємність при коливаннях температури майже не змінюється. Конденсатори червоного та зеленого кольору мають значний від'ємний ТКС, тобто при зростанні температури вони зменшують свою ємність. Ці конденсатори називаються *термокомпенсаційними*. Область їх використання – коливні контури в генераторах, підсилювачах ВЧ, НЧ та ін. Вказані конденсатори компенсують зміну величини індуктивності в котушках, де температурний коефіцієнт додатній. Таким чином, стабільність частоти контуру залишається у допустимих межах

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx const. \quad (6.2)$$

Конденсатори, в яких діелектрик виготовлений з НЧ-кераміки, фарбуються в оранжевий колір. Вказані конденсатори ще називають *сегнетокерамічними*.

**Склокерамічні конденсатори** призначені для роботи у височастотних, а також імпульсних пристроях. Діелектриком є тонкі пластинки зі скла або склокераміки, обкладки – алюмінієва фольга. Парні та непарні пластини з фольгою з'єднують окремо, приєднують два контакти, збирають в пакет, поміщують в корпус.

**Вариконд** – це сегнетокерамічний конденсатор з різко вираженою нелінійною залежністю ємності від електричної напруги.

Для виготовлення варикондів використовують матеріали з різко вираженими електричними властивостями – сегнетоелектрики на основі титанату барію  $BaTiO_3$ .

Однією з основних характеристик варикондів є коефіцієнт нелінійності, тобто відношення максимального значення діелектричної проникності при максимальній напруженості електричного поля до початкового значення діелектричної проникності. У змінних електричних полях діелектрична проникність може збільшуватись до 50 разів, тобто у стільки разів і зростає ємність вариконду.

Вариконди мають номінальні значення ємностей для напруги  $U = 5$  В та частоти  $f = 50$  Гц від 10 пФ до 100 нФ. Вони характеризуються високою механічною міцністю та стійкістю до вібрацій.

Виготовляються у вигляді дисків зібраних у циліндр. Недоліками їх є температурна та часова нестабільність ємності, обмежений діапазон робочих частот, високі значення  $tg\delta$ .

Вариконди використовують у підсилювачах змінного та постійного струму, у стабілізаторах струму й напруги, генераторах і множниках частоти.

### **6.3.4. Позначення конденсаторів у радіоелектронних пристроях**

Скорочене умовне позначення складається із таких секцій:

*Перша секція (скорочене позначення):*

1. Перший елемент – буква або комбінація букв, що позначають конденсатор: К – постійної ємності; КТ – налаштовувальний; КП – змінної ємності; КС – конденсаторні блоки;

2. Другий елемент – число, що характеризує використаний тип (типи) діелектрика, наприклад: 10 – керамічний; 15 – керамічний, високовольтний; 40 – паперовий, з фольговими обкладками;

50 – оксидні алюмінієві, електролітичні, фільтрові; 52 – танталові, електролітичні; 53 – оксидно-напівпровідникові, електролітичні; 60 – ніобієві, електролітичні; 70 – полістирольні; 73 – поліетилен-терефталатні; 75 – комбіновані з металізованими обкладками; 78 – плівкові, поліпропіленові з металізованими обкладками.

Кожен з перерахованих типів конденсаторів має підтипи. Наприклад, конденсатори К-50, К-75 мають більше 30 підтипів, К-73, К-53 більше 15 і т.д.

3. Третій елемент – порядковий номер розробки конкретного типу конденсатора (іноді може бути буква). Між другим та третім елементами в умовному позначенні ставиться дефіс.

*Друга секція* – значення основних параметрів та характеристик, необхідних для поставок або запису в технічній документації:  $U_{\text{ном}}$ ,  $C_{\text{ном}}$ ,  $\Delta C_{\text{ном}}$ , ТКС, конструктивне виконання, реактивна потужність  $Q$ ,  $\text{tg}\delta$  та ін.

Приклад повного умовного позначення:

$$\begin{array}{c} \text{I секція} \quad \quad \quad \text{II секція} \\ \hline \text{K53-6-20B-10 мкФ} \pm 5\%; \end{array}$$

К – конденсатор, оксидно-напівпровідниковий, електролітичний, номер розробки – 6, робоча напруга – 20 В, ємність – 10 мкФ, відхилення від номіналу  $\pm 5\%$ .

На рис.6.13 показано умовні графічні позначення конденсаторів на принципових електричних схемах, де показано: 1 – конденсатор постійної ємності; 2 – полярний електролітичний конденсатор; 3 – неполярний електролітичний конденсатор; 4 – прохідний конденсатор; 5 – опорний конденсатор; 6 – конденсатор змінної ємності; 7 – налаштовувальний конденсатор; 8 – вариконд; 9 – термоконденсатор.

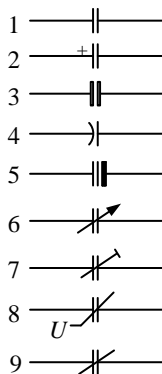


Рис.6.13. Умовні позначення конденсаторів на електричних схемах

Для раніше розроблених типів конденсаторів збережені позначення або назви, в основу яких закладені різноманітні ознаки – конструктивні, технологічні та інші, наприклад:

КБГ – конденсатор паперовий, герметичний;  
КТ – конденсатор трубчастий;  
КСО – конденсатор слюдяний, обтиснений;  
КД – конденсатор дисковий;  
МБМ – конденсатор металопаперовий, малогабаритний;  
КМ – конденсатор монолітний;  
СГМ – конденсатор слюдяний, герметичний, малогабаритний;  
КДО – конденсатор дисковий, опорний;  
КДУ – конденсатор дисковий для ультракоротких хвиль;

Часто при маркуванні конденсаторів зустрічаються і їх імпортні позначення.

Приклад 1. На корпусі конденсатора нанесено маркування кодом:  $36\ p\ KL$ . Це означає, що номінальна ємність – 36 пікофарادي, допустиме відхилення –  $\Delta C$  (табл. 6.5) від  $C_{\text{ном}} \pm 10\ %$  (табл. 6.5), ТКС групи М75 (тобто  $75 \cdot 10^{-6} / 1^\circ\text{C}$ ) (табл.6.7).

Приклад 2. Напис:  $m12\ SF$  означає, що номінальна ємність конденсатора  $C_{\text{ном}}$  дорівнює 120 мкФ, відхилення від номіналу –  $\Delta C: (-20 \div +50)\%$ , робоча напруга – 20 В (табл.6.6).

За останні роки нові технології привели до значного збільшення розробок і виготовлення типів конденсаторів з більш досконалими діелектриками: стабільність параметрів покращилась, зменшились габарити, розширились межі номінальних робочих напруг і частот.

Ситуація з розвитком конденсаторів аналогічна розвитку резисторів. Для мікроелектроніки створюються «чип»-конденсатори. Освоєння НВЧ-діапазону потребує створення спеціальних конденсаторів із малою індуктивністю та малими втратами для автоматизованого збирання і монтажу радіоелектронної апаратури.

Велике значення в апаратурі зв'язку надається підвищенню заводозахисності, в тому числі від промислових радіоперешкод. З цією метою розробляються заводозахисні конденсатори та фільтри з відповідними смугами усунення завод.

## 6.4. Індуктивні компоненти

В електричних та електронних колах застосовують три основні види індуктивних компонентів – котушки індуктивності, дроселі та трансформатори.

### 6.4.1. Котушки індуктивності

*Котушки індуктивності* є комплектуючими компонентами в електрорадіотехніці так як резистори і конденсатори. Під час протікання через них електричного струму вони накопичують енергію магнітного поля, Дж:

$$W = \frac{LI^2}{2}, \quad (6.3)$$

де  $L$  – індуктивність котушки, Гн.

Котушки індуктивності є нестандартизованми виробами, тому у кожному конкретному випадку застосування їх конструкцію розраховують за заданими електричними параметрами, основними з яких є номінальна індуктивність і її допуск, добротність, температура стабільність і власна ємність.

Індуктивність проводу (Гн) визначається за формулою [15]:

$$L = 20l \cdot \ln\left(\frac{4l}{d} - 1\right) \cdot 10^{-12}, \quad (6.4)$$

де  $l$  – довжина, м;  $d$  – діаметр проводу, м.

Наприклад, 5 м проводу діаметром 2 мм має індуктивність всього 0,92 нГн. Отже, для збільшення індуктивності одиничного проводу потрібно збільшувати його довжину. Для цього провід намотують у спіраль витками. При цьому кожен виток знаходиться не тільки у власному магнітному полі, але і у магнітному полі сусідніх витків. Індуктивність котушки стає набагато більшою індуктивності одиничного проводу такої довжини.

Намотування проводу у спіраль дає можливість сконцентрувати магнітний потік у невеликому об'ємі і створити сприятливі умови для заміни повітряного середовища магнітним матеріалом з високою магнітною провідністю. Для цього використовують феромагнітні осердя, при цьому індуктивність котушки збільшується в  $\mu$  разів. Переміщення осердя всередині каркасу дає змогу змінювати індуктивність котушки.

На низьких частотах (десятки-сотні Герц) використовують сердечники з електротехнічних сталей, а саме пермалоїв. Для зменшення втрат на вихрові струми сердечники набирають з ізольованих одна з одною пластин товщиною до 0,1 мм.

Котушки з феромагнітним осердям мають меншу кількість витків при заданій індуктивності, а відповідно й габарити, більшу добротність.

На високих частотах застосовують підлаштовувальні циліндричні сердечники з діамагнітних матеріалів таких як латунь, мідь, алюміній, для того, щоб втрати, що вносяться сердечником були мінімальними.

При введенні в котушку немагнітних матеріалів магнітна проникність, індуктивність і добротність зменшуються, причому індуктивність зменшується пропорційно довжині діамагнетика в котушці. Наприклад, при введенні в котушку алюмінію в порівнянні з міддю зменшує її індуктивність в однаковій мірі, але добротність зменшується приблизно в два рази. Тому алюмінієві сердечники використовують у котушках для ширококутових контурів для спеціальних приймачів.

При наявності осердя індуктивність котушки залежить від її геометричних розмірів, властивостей матеріалу осердя і кількості витків:

$$L = \frac{\mu\mu_0 w^2 S}{l_{сер}}, \quad (6.5)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність осердя;  $w$  – кількість витків;  $S$  – площа поперечного перерізу,  $l_{сер}$  – середня довжина магнітопроводу.

Каркаси котушок як правило мають циліндричну форму і виготовляють з радіофарфору, полістиролу, гетинаксу, існують також безкаркасні котушки. Для намотування котушок індуктивності використовують мідні проводи, розглянуті в пункті 6.1.

Котушки створюють реактивний опір змінному струму. Принцип роботи котушок індуктивності пов'язаний на взаємодії магнітного потоку  $\Phi$  та струму  $I$ .

Струм, що проходить через котушку приводить до появи ЕРС самоіндукції  $E$ . Її значення залежить від індуктивності:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (6.6)$$

Фізичні процеси, що протікають у котушках в колах постійного та змінного струмів є різними. При дії постійної напруги струм у котушці встановлюється не відразу, а через деякий час, то-

му що у момент вмикання змінюється магнітний потік і в котушці наводиться ЕРС, що перешкоджає наростанню струму.

При дії змінного синусоїдного струму  $i = I_{max} \sin \omega t$  магнітний потік буде змінюватись неперервно і наведена ЕРС також буде протидіяти протіканню струму, що еквівалентно збільшенню опору провідника. Чим вища частота струму  $f$ , тим більша наведена ЕРС і реактивний опір  $X_L$ :

$$X_L = 2\pi fL = \omega L; \quad E = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_{max} \cos \omega t = -X_L I_{max} \cos \omega t. \quad (6.7)$$

На рис.6.15 показано вигляд котушок індуктивності різного призначення.

Котушки індуктивності діапазону радіохвиль класифікуються за різними ознаками.

**За частотним діапазоном** вони поділяються на котушки надвисокохвильові, короткохвильові, середньохвильові.

**У залежності від призначення** – контурні (для коливальних контурів), зв'язку (які передають електромагнітні коливання з одного контуру до іншого), дроселі високої частоти.

**За можливістю зміни індуктивності** – котушки з постійною та змінною індуктивністю (варіометри).

**За конструктивними ознаками** – котушки циліндричні, торіодні (кільцеві), спіральні, броньові, одношарові та багатшарові, з осердям та без осердя, із каркасом та без каркаса, з екраном та без екрана.

Котушки індуктивності для коливальних контурів виконуються як правило одношаровими циліндричними, розміщеними на ізоляційних каркасах або без них з метою отримання високих значень добротності, нехтуючи стабільністю індуктивності, наприклад для контурів вхідних пристроїв приймачів діапазону метрових хвиль. Діаметр проводу для таких котушок вибирають з умов жорсткості конструкції (більше 1 мм) з числом витків до 10.

*Циліндричні сердечники* котушок індуктивності виконують як правило різьбовими для можливості регулювання повітряного за-



Рис.6.15. Загальний вигляд котушок індуктивності

зору всередині котушки, а заодно й індуктивності в налаштуванні електрорадіоапаратури.

Котушки з *тороїдальними сердечниками* мають мінімальні розміри, зовнішнє магнітне поле в них практично відсутнє, що дає змогу використовувати їх без екранів з порівняно високою добротністю. Недоліки цих котушок полягають у складності їх намотування і неможливості регулювання індуктивності. Такі котушки використовують у контурах проміжної частоти малогабаритних приймачів в контурах і як дроселі. Вибір матеріалу і розміру сердечника для таких котушок визначається багатьма факторами. Для забезпечення високої стабільності параметрів котушки застосовують альсифери із стабільним температурним коефіцієнтом магнітної проникності. Індуктивність та добротність тороїдальних котушок проорційні їх розмірам.

**Варіометри** – це котушки зі змінною індуктивністю, які застосовуються для плавного регулювання індуктивності коливальних контурів. Це може здійснюватися:

- плавною зміною кількості витків рухомим контактом;
- зміною взаємної індуктивності між сусідніми котушками;
- переміщенням магнітного або немагнітного осердя всередині котушки.

Основним параметром варіометра є коефіцієнт перекриття за індуктивністю:

$$K_L = \frac{L_{max}}{L_{min}}, \quad (6.8)$$

де  $L_{max}$  і  $L_{min}$  – максимальна й мінімальна індуктивності.

У варіометрах зі змінною кількістю витків зміна індуктивності здійснюється шляхом закорочення частини витків контактом, який ковзає вздовж обмотки котушки.

Варіометри з магнітним осердям мають нерухому котушку, всередині якої переміщується осердя з карбонільного заліза або фериту.

**Екранування котушок індуктивності** використовують для зменшення паразитних зв'язків між котушками індуктивності та іншими елементами апаратури зі своїм електромагнітним полем. Ефективність екранування підвищується на високих частотах, збільшенні товщини та зменшенні питомого опору матеріалу екрана.



Екрани високочастотних котушок індуктивності виготовляють як правило з міді товщиною 0,5 мм.

Але застосування екранів зменшує індуктивність котушки на 10÷20%, збільшує власну ємність на 10÷30%, збільшує втрати та знижує індуктивність.

На рис.6.16 прийняті такі умовні позначення котушок індуктивності на принципових схемах де показано: а) котушку з відводом; б) котушку з осердям; в) котушку з рухомим осердям; г) котушку без осердя, д) котушку з немагнітним рухомим осердям.

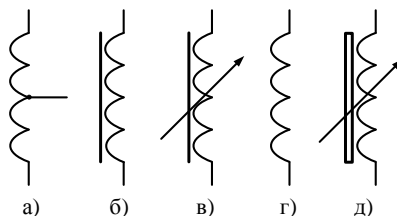


Рис.6.16. Умовні позначення котушок індуктивності

## 6.4.2. Параметри котушок індуктивності

Властивості котушок індуктивності зумовлені їх параметрами, до яких належать:

- номінальна індуктивність та допуск;
- власна ємність;
- добротність;
- температурний коефіцієнт індуктивності.

**Номінальна індуктивність** – це індуктивність, яка вказана на корпусі котушки або наведена у її паспорті. Індуктивність котушок зазвичай лежить в межах від декількох наноГенрі до декількох десятків міліГенрі.

Одиницею вимірювання індуктивності є Генрі (Гн) або міліГенрі (1мГн =  $10^{-3}$  Гн), мікроГенрі (1мкГн =  $10^{-6}$  Гн).

Фактичне значення індуктивності котушки може відрізнятись від розрахункового (номінального) значенням допуску. Допуски котушок коливальних контурів лежать у межах (0,2÷0,5)% і більше, а для котушок зв'язку, дроселів та інших, які працюють не на резонансних частотах – (10÷15)%.

**Власна ємність** виникає між витками котушки індуктивності. Її значення лежать в межах 50 нФ. Крім того, до власної ємності відносять ємність між обмоткою, каркасом та осердям.

Наявність власної ємності погіршує параметри котушки, а саме знижує її добротність і температурну стабільність. Тому при конструюванні котушок намагаються зменшити її власну ємність.

Це досягається застосуванням спеціальних обмоток та каркасів із малими діелектричними втратами.

**Добротність котушки індуктивності**  $Q_L$  пов'язана з втратами енергії і знаходиться як відношення її індуктивного опору до активного:

$$Q_L = \frac{X_L}{R}. \quad (6.9)$$

При конструюванні котушок індуктивності намагаються отримати її максимальну добротність. Це досягається:

- застосуванням багатожильного проводу (літцендрату);
- застосуванням проводу з оптимальним діаметром;
- застосування каркасу з ізоляційних матеріалів, що мають малі втрати;

- застосуванням осердя з високочастотного феромагнітного матеріалу (карбонільного заліза, фериту), що дає змогу отримати задану індуктивність при меншій довжині проводу.

**Температурна стабільність.** Температурні зміни індуктивності визначаються температурним коефіцієнтом індуктивності, тобто відносною зміною індуктивності при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$ :

$$TKL \alpha_L = \frac{1}{L_1} \cdot \frac{L_2 - L_1}{T_2 - T_1}, \quad (6.10)$$

де  $L_1$  та  $L_2$  – індуктивності при температурах  $T_1$  та  $T_2$  відповідно.

Температурна нестабільність індуктивності пов'язана зі зміною діаметра та довжини котушки, а також із зміною магнітної проникності осердя при зміні температури.

### 6.4.3. Дроселі

За своїм призначенням дроселі поділяють на низькочастотні (силові) та високочастотні.

Дросель електричний низькочастотний – це котушка індуктивності, що вмикається послідовно з навантаженням для обмеження (блокування) високочастотних складових змінного струму, а також підвищення завадостійкості електричних мереж.

Дроселі використовуються в багатьох електротехнічних та радіопристроях. Сердечник дроселя виготовляють з електротехнічної сталі або з фериту. При низьких частотах в електричних колах

дроселі виконують роль індуктивного опору. Такі дроселі протидіють різким змінам струму, тобто стабілізують і регулюють його, а також розділяють і обмежують електричні сигнали різних частот, згладжують пульсації випрямленого струму. У системах автоматичного керування їх застосовують як низькочастотні фільтри та для корекції амплітудно-частотних характеристик.

Дроселем високої частоти є котушка індуктивності, що вмикається в коло для збільшення опору струмам високої частоти, тобто пропускають тільки струми низької частоти. Конструктивно високочастотні дроселі виконують у вигляді одношарових, що використовують для роботи в областях коротких хвиль і багатшарових котушок з магнітним сердечником або без нього для роботи в областях довгих і середніх хвиль.

На рис.6.17, 6.18 показано вигляд силових і радіочастотних дроселів.



6.17. Силові дроселі



6.18. Радіочастотні дроселі

Добротність дроселів як і котушок індуктивності важлива під час під'єднання його паралельно до коливальних контурів.

Число витків дроселів визначають аналогічно як для котушок індуктивності. Діаметр проводу вибирають з умов оптимальної густини струму і падінні напруги на дроселі не більше 10% від напруги джерела.

Основними параметрами дроселів є їх індуктивність, номінальний струм підмагнічування, повний опір, опір постійному струму і власна ємність (повинені бути якнайменшими). Власна ємність  $C_0$  дроселя впливає на його критичну частоту  $f_{кп}$ . При частотах менших за критичну повний опір дроселя має індуктивний характер (активний опір  $R \approx 0$ ). Ця частота повинна бути завжди більшою за робочу частоту апаратури, в якій працює цей дросель.

## 6.4.4. Трансформатори

### 6.4.4.1. Призначення, область застосування, принцип дії

Трансформатором називається статичний індуктивний перетворювач, що має дві або більше індуктивно зв'язаних взаємонерухомих обмоток і призначений для перетворення за допомогою магнітного поля однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну), що має інші характеристики, зокрема, напругу та струм. У більшості випадків за допомогою трансформатора перетворюються тільки напруга і струм без зміни частоти і числа фаз, а також виконується узгодження опорів електричних кіл.

Трансформатор, що має дві електрично незв'язані між собою обмотки, називається двообмотковим. Обмотка, що споживає енергію з електричної мережі, називається первинною, а обмотка, що віддає енергію споживачу, – вторинною. Існують багатообмоткові трансформатори, які мають декілька первинних і вторинних обмоток.

Залежно від кількості фаз розрізняють однофазні, трифазні і багатофазні трансформатори. Трансформатори призначені:

1. Для пересилання і розподілу електричної енергії.

На електростанціях електрична енергія виробляється за допомогою турбо- або гідрогенераторів напругою до 38,5 кВ. Для зменшення втрат потужності у провідниках і зменшення перерізу проводів лінії електропередачі напругу лінії підвищують до 750 кВ і більше. Тому на підстанціях електростанцій встановлюють трансформатори, що підвищують напругу до необхідної величини (110, 220, 110, 400, 750 кВ). Оскільки більшість споживачів споживають енергію напругою 127, 220, 380 і 660 В (в окремих випадках 6 кВ), то виникає необхідність у встановленні ряду понижувальних трансформаторів.

2. Для забезпечення необхідної схеми вмикання вентилів у перетворюючих пристроях.

У вентильних випрямлячах змінного струму або перетворення його з постійного у змінний, відношення напруги на вході і виході залежить від схеми вмикання вентилів. Тому при поданні на вхід стандартної напруги напруга на виході буде нестандартною. Для усунення цього недоліку вентильні перетворювачі постачаються трансформаторами, що забезпечують на виході стандартну на-

пругу при заданій схемі вмикання вентилів. Трансформатори, що використовуються з цією метою, називають перетворюючими.

3. Для різних технологічних процесів: зварювання (зварювальні трансформатори), живлення електротермічних установок та ін.

4. Для вмикання електровимірювальних приладів (електровимірювальні трансформатори) і деяких апаратів (реле та ін.) в електричні кола високої напруги або в кола, де протікають великі струми, з метою розширення границь вимірювання та забезпечення електробезпеки.

На рис.6.20, 6.21 показано загальний вигляд деяких трансформаторів.



Рис.6.20. Трансформатор для кіл керування



Рис.6.21. Однофазний понижувальний трансформатор серії ОСО

Узгоджувальні трансформатори застосовуються найчастіше у вихідних каскадах підсилювачів низької частоти для узгодження опору навантаження з вихідним опором вихідного каскаду. Для міжкаскадного зв'язку узгоджувальні трансформатори застосовують тоді, коли потрібна велика амплітуда струму на виході підсилювача. В цьому випадку використання узгоджувального трансформатора дає змогу значно підвищити підсилення потужності і понизити витрату електроенергії [5].

Трансформатори узгодження мають осердя з високою магнітної проникністю, а трансформатори живлення – осердя з високою індукцією насичення.

Незважаючи на різновидність трансформаторів і величин їх потужностей, теорія їх є єдина і ґрунтується на законі електромагнітної індукції. Зі сторони первинної обмотки з кількістю витків  $w_1$  трансформатор є споживачем електричної енергії, а зі сторони вторинної обмотки з кількістю витків  $w_2$  він є джерелом електричної

енергії для приймача з опором  $Z$ . Струм  $i_2$  у вторинній обмотці визначається опором  $Z$ . При деякому значенні цього опору ( $Z = Z_n$ ) через вторинну обмотку протікає номінальний струм ( $i_2 = i_{2n}$ ). Зменшення ( $Z < Z_n$ ) або збільшення ( $Z > Z_n$ ) опору  $Z$  порівняно з опором  $Z_n$  приводить трансформатор до перевантаження ( $i_2 > i_{2n}$ ) або до недовантаження ( $i_2 < i_{2n}$ ). При  $Z = 0$  трансформатор буде працювати в режимі короткого замикання, ( $i_2 \gg i_{2n}$ ), а при  $Z = \infty$  струм вторинної обмотки  $i_2 = 0$ , трансформатор буде працювати в режимі неробочого ходу. В останньому випадку трансформатор не перетворює електричну енергію, що і спонукає таку назву режиму.

Розглянемо електромагнітні процеси у трансформаторі в режимі неробочого ходу на прикладі понижувального двообмоткового трансформатора, принципова схема якого зображена на рис.6.22. Під дією прикладеної до первинної обмотки синусоїдної напруги  $U_1$  через неї протікає струм неробочого ходу  $i_{10}$ . Струм  $i_{10}$ , протікаючи через витки первинної обмотки, збуджує основний змінний магнітний потік  $\Phi$ , що замикається через феромагнітний магнітопровід і зчеплюється з всіма витками первинної і вторинної обмоток та наводить у них ЕРС  $e_1$  та  $e_2$ :

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (6.11)$$

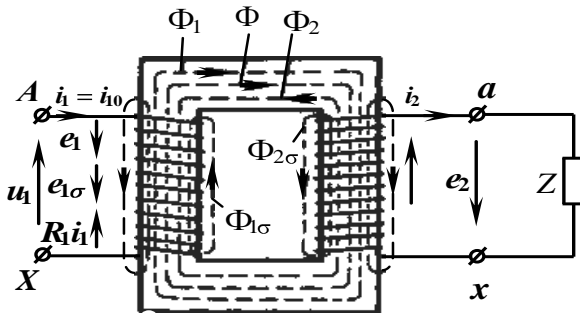


Рис.6.22. Схема однофазного трансформатора

Співвідношення ЕРС у вторинній обмотці й напруги на первинній залежить від кількості витків у обох обмотках.

З (6.11) випливає, що індуковані в обмотках ЕРС прямопропорційні кількості витків обмоток, а відношення їх дорівнює відношенню кількості витків або приблизно дорівнює відношенню обмоток:

$$n = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (6.12)$$

При дослідженні і аналізі трансформаторів розрізняють три основні характеристики.

Характеристика неробочого ходу проводиться при подачі номінальної напруги на первинну обмотку, а вторинна розімкнена. Тут визначають втрати у сталі, коефіцієнт трансформації, а також опори вітки намагнічування (магнітопроводу).

Зовнішня характеристика є залежністю напруги на виході трансформатора від струму навантаження  $U_2 = f(I_2)$ . Тобто це зміна вторинної напруги  $\Delta U$  трансформатора або арифметична різниця між вторинними напругами трансформатора при неробочому ході та при заданому струмі навантаження  $I_2$ , коли напруга первинної обмотки є постійною та дорівнює номінальній величині  $U_{1H}$ .

Дослід короткого замикання трансформатора здійснюють наступним чином. Вторинну обмотку замикають накоротко, а до первинної обмотки для уникнення перегрівання і пошкодження трансформатора підводять понижену напругу  $U_{1K}$ , при якій струми в обох обмотках дорівнюють номінальним. Цю напругу називають напругою короткого замикання  $U_K$  (%), що задана в паспорті трансформатора. З дослідження короткого замикання визначають активні та реактивні опори первинної та вторинної обмоток.

#### 6.4.4.2. Номінальні дані трансформаторів

Трансформатори виготовляються за технічними умовами або згідно вимог стандартів і призначені виробником для виконання певних функцій з перетворення електричної енергії.

Параметри, що відносяться до того режиму роботи, для якого трансформатор призначений виробником, називаються номінальними. При цих параметрах трансформатор може як завгодно довго працювати, не перегріваючись вище від допустимих норм.

У паспорті трансформатора (заводська табличка, що кріпиться до трансформатора) вказують наступні номінальні величини:

1. Номінальна первинна лінійна напруга  $U_{1H}$ .
2. Номінальна вторинна лінійна напруга  $U_{2H}$  на розімкненій вторинній обмотці при живленні первинної обмотки напругою  $U_{1H}$ , номінальної частоти.

3. Номінальну потужність  $S_n$ , під якою розуміють повну потужність трансформатора на затискачах вторинної обмотки. Для двообмоткових трансформаторів номінальна потужність первинної обмотки  $S_{1n}$  приймається рівною номінальній потужності вторинної обмотки  $S_{2n}$  і дорівнює номінальній потужності трансформатора  $S_n$ .

Номінальна потужність трансформатора пропорційна частоті напруги мережі, індукції у магнітопроводі, густині струму в обмотках, перерізу сталі в магнітопроводах і перерізу провідників обмоток.

4. Напруга короткого замикання.

Номінальна частота  $f_n$  напруг і струмів для трансформаторів загального використання стандартизована і дорівнює 50 Гц. Слід відмітити, що номінальні дані не вказують на те, що трансформатор необхідно експлуатувати тільки при них. Робота трансформатора можлива в діапазоні зміни вторинного струму від 0 до  $I_{2n}$ , можливі короточасні перевантаження, а також невеликі зміни напруги і частоти, спеціально зумовлені стандартами.

До основних параметрів узгоджувальних трансформаторів відносять індуктивний опір первинної обмотки  $X_1$ , індуктивний опір розсіяння  $X_m$ , активні опори обмоток  $R_1$ ,  $R_2$ , коефіцієнт трансформації  $n$ .

### **6.4.4.3. Конструкції магнітопроводів та обмоток трансформаторів**

Магнітопроводи силових трансформаторів зустрічаються в двох основних виконаннях: стержневому і броньовому. Тип сердечника дає і назву трансформатору.

Магнітопровід однофазного стержневого трансформатора (рис.6.23,а) має два стержні, на яких розміщені обмотки, і два (верхнє та нижнє) ярма, які замикають магнітопровід.

Кожна з двох обмоток (1, 2) складається з двох частин, що розміщені на двох стержнях, і з'єднаних послідовно або паралельно. При такому розміщенні первинної і вторинної обмоток збільшується електромагнітний зв'язок між ними.

Однофазний трансформатор броньової конструкції (рис.6.23,б) має один стержень з обмотками і розгалужене ярмо, яке частково закриває обмотки подібно "броні". Така конструкція дещо зменшує висоту трансформатора за рахунок висоти ярм (зменшення в два рази перерізу ярма порівняно зі стержнем, на якому розміщені обмотки).



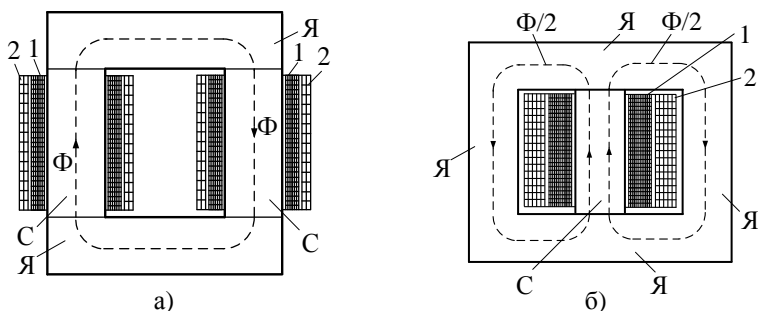


Рис.6.23. Будова однофазного стержневого (а) і броневого (б) трансформаторів: 1 – обмотка НН; 2 – обмотка ВН; Я – ярма; С – стержні

У другому випадку збирання магнітопроводів листи стержнів і ярм складаються разом із перекриттям стиків. Для встановлення обмоток листи верхнього ярма виймаються і потім знову захищовуються. Немагнітні проміжки у стикі між листами одного шару перекриваються листами сусідніх шарів і не створюють помітного впливу на споживану трансформатором реактивну потужність порівняно зі стиковим магнітопроводом.

Для кращого заповнення простору всередині котушки сталлю перерізу стержня надають форму квадрата або, значно частіше, вписаного в коло ступінчастого багатокутника (рис.6.24).

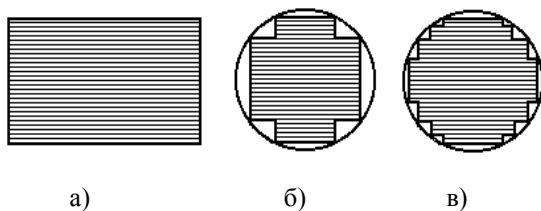


Рис.6.24. Переріз стержнів трансформаторів: а) квадратний, б) хрестоподібний, в) багатоступінчастий

Кількість сходинок буде тим більшою, чим більша потужність трансформатора і чим більший діаметр описаного кола. Однак велика кількість сходинок ускладнює технологію виготовлення магнітопровода трансформатора.

Магнітопровод у зібраному вигляді разом із з'єднувальними деталями і ярмовими балками утворює кістяк трансформатора.

Магнітопровод трансформатора повинен мати найменші втрати на вихрові струми і гістерезис. Це вирішується за допомогою:

- використання спеціальних електротехнічних сталей, що мають малу площу петлі гістерезису;
- використання електротехнічних сталей, які завдяки спеціальним домішкам мають збільшений питомий електричний опір;
- складання магнітопроводу із ізованих одна від одної пластин електротехнічної сталі, щоб вихрові струми не викликали значних втрат (товщина пластин залежить від частоти перемагнічування і при частоті 50 Гц складає 0,35 або 0,5 мм).

*Обмотки трансформаторів.* Їх виготовляють із мідних або алюмінієвих провідників. Поперечний переріз алюмінієвого провідника береться на 70% більшим, ніж мідного внаслідок більшого питомого електричного опору алюмінію. У зв'язку з цим габарити і маса трансформатора з алюмінієвими обмотками більша, ніж у трансформатора з мідними обмотками. Для невеликих потужностей і струмів використовують провід круглого перерізу, а для великих потужностей використовують провід прямокутного перерізу. За способом взаємного розміщення обмоток ВН і НН та їх розміщенням на стержнях розрізняють обмотки концентричні (рис.6.25,а) і переміжні (рис.6.25,б).

Концентричні обмотки мають форму циліндрів різних діаметрів і розміщені одна відносно одної та навколо стержня концентрично. Близьче до стержня розміщують обмотку НН, бо її легше ізолювати від стержня, а зовні – обмотку ВН.

В переміжних обмотках котушки ВН і НН чергуються уздовж стержня по висоті.

Переміжні обмотки мають кращий електромагнітний зв'язок, однак вони складні у виготовленні. Тому у силових трансформаторах переважно застосовують концентричні обмотки.

Найпростішою концентричною обмоткою є циліндрична, яка виготовляється у вигляді котушки, виток якої складається із одного або декількох паралельних провідників, а витки і всі їх паралельні провідники розміщені в одному рядку без інтервалів в осьовому напрямку на циліндричній поверхні.

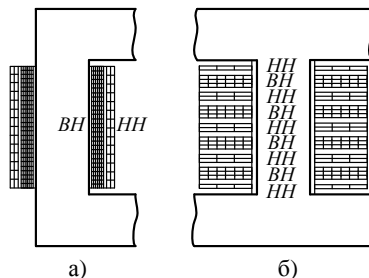


Рис.6.25. Концентричні (а) і переміжні (б) обмотки

## **Контрольні запитання**

1. Класифікація проводів та кабелів.
2. Призначення резисторів та їх основні параметри.
3. За якими ознаками класифікують резистори.
4. Приведіть приклад маркування резисторів.
5. Що називають вольт-амперною характеристикою резистора?
6. Основні параметри та області застосування терморезисторів.
7. Принцип роботи і призначення варисторів.
8. Переваги й недоліки проволочних резисторів у порівнянні з композиційними.
9. Призначення конденсаторів та їх основні параметри.
10. Перерахуйте, які матеріали використовуються для виготовлення конденсаторів.
11. Які параметри впливають на значення ємності конденсаторів.
12. Призначення котушок індуктивності та їх основні параметри.
13. Поясніть явище виникнення ЕРС індукції.
14. Графічне позначення резисторів, конденсаторів та котушок індуктивності на схемах.
15. Призначення дроселів та області їх застосування.
16. Принцип роботи трансформатора.
17. Перелічіть номінальні дані трансформаторів і на що вони вказують.
18. Основні характеристики трансформатора.
19. Приведіть конструкції обмоток трансформаторів і порівняйте їх.
20. Приведіть і порівняйте конструкції магнітопроводів трансформаторів.

## 7. ПРАКТИКУМ

**Задача.** Визначте, яке співвідношення потрібно взяти за об'ємом компонентів пластмаси, в якій в'яжучим є полістирол, а наповнювачем тіконд Т-150 на основі титанату кальцію, щоб діелектрична проникність цієї пластмаси дорівнювала  $\epsilon_c = 7,5$ . Діелектрична проникність тіконду рівна  $\epsilon_1 = 150$ , а полістиролу  $\epsilon_2 = 2,5$ .

### *Розв'язування*

Вважаємо, що компоненти розміщені послідовно, тобто маємо двошаровий діелектрик. Діелектрична проникність такої пластмаси дорівнює:

$$\frac{1}{\epsilon_c} = \frac{y_1}{\epsilon_1} + \frac{y_2}{\epsilon_2} \quad \text{або} \quad \epsilon_c = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{y_1 \cdot \epsilon_2 + y_2 \cdot \epsilon_1}.$$

де  $y_1 + y_2 = 100\%$  – об'ємний вміст кожного матеріалу.

Для простоти розрахунків приймаємо відносні одиниці, тобто  $y_1 + y_2 = 1$ .

$$y_1 \cdot \epsilon_2 + y_2 \cdot \epsilon_1 = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_c}; \quad y_2 = 1 - y_1; \quad y_1 \cdot \epsilon_2 + 1 - y_1 \cdot \epsilon_1 = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_c};$$

$$y_1 \cdot \epsilon_2 + \epsilon_1 - y_1 \cdot \epsilon_1 = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_c}; \quad y_1 \cdot \epsilon_2 - \epsilon_1 + \epsilon_1 = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_c};$$

$$y_1 = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_c} - \epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} = \frac{\frac{150 \cdot 2,5}{7,5} - 150}{2,5 - 150} = \frac{-100}{-147,5} = 0,67.$$

$$y_2 = 1 - y_1 = 1 - 0,67 = 0,33.$$

Отже, в суміші має бути 67% тіконду і 33% полістиролу.

**Задача.** Визначити залежність діелектричної проникності пористого поліхлорвінілу від його густини та побудувати графік цієї залежності. Суцільний (без пор) поліхлорвініл має густину  $1400 \text{ кг/м}^3$ , а діелектричну проникність  $\epsilon = 4$ .

Розв'язування

Для розрахунку скористаємось рівнянням Клазіуса-Мосотті.

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{D} = \frac{N_A \cdot \alpha}{3},$$

де  $M$  – молекулярна маса речовини;  $D$  – густина;  $N_A$  – стала Авогадро;  $\alpha$  – коефіцієнт поляризованості,   $P_e$  – поляризований момент;  $k$  – стала Больцмана;  $E$  – напруженість електричного поля;  $T$  – температура.

Надалі вважаємо, що змінюється лише один параметр (за умовою задачі – це густина). Тоді  $\alpha = const$ . Отже,  $P_e, E, T = const$ . Спростимо вихідне рівняння.

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = c \cdot D;$$

Визначимо  $c$  через початкові умови.

$$c = \frac{\varepsilon - 1}{(\varepsilon + 2) \cdot D} = \frac{4 - 1}{(4 + 2) \cdot 1400} = \frac{3}{6 \cdot 1400} = 3,57 \cdot 10^{-4}.$$

Після перетворення маємо:

$$\varepsilon - 1 = c \cdot D(\varepsilon + 2); \quad \varepsilon - 1 = c \cdot D\varepsilon + 2cD; \quad \varepsilon \cdot (1 - cD) = 2cD + 1.$$

Загальна формула для розрахунку діелектричної проникності:



Задаючись значеннями від  $D = 1400$  до  $D = 0$ , обчислюємо  $\varepsilon$  і результати заносимо в таблицю.

$D, \text{кг/м}^3$	1400	1200	1000	800
$\varepsilon, \text{в.о.}$	4	3,24	2,66	2,2
$D, \text{кг/м}^3$	600	400	200	0
$\varepsilon, \text{в.о.}$	1,85	1,5	1,23	1

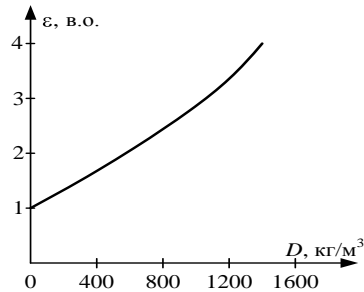


Рис.7.1. Залежність  $\varepsilon = f(D)$

**Задача.** Визначити напругу на обох шарах двошарового діелектрика, який працює під змінним струмом напругою 1 кВ. Шари мають товщину 2 і 4 мм і виготовлені відповідно з полістиролу  $\epsilon_1 = 2,56$  і поліхлорвінілу  $\epsilon_2 = 3,1$ . Визначити також значення напруженості поля в цих шарах. Побудувати також картину електричного поля  $U = U(h)$  та  $E = E(h)$  в двошаровому діелектрику.

*Розв'язування*

Двошаровий діелектрик представляє собою два послідовно з'єднаних конденсатори. Їх ємності:

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_0 \cdot S}{h_1}; \quad C_2 = \frac{\epsilon_2 \cdot \epsilon_0 \cdot S}{h_2};$$

$$\epsilon_0 - \text{постійна; } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}};$$

Сумарна ємність такого конденсатора:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}; \quad \frac{1}{C} = \frac{h_1}{\epsilon_1 \cdot \epsilon_0 \cdot S} + \frac{h_2}{\epsilon_2 \cdot \epsilon_0 \cdot S} = \frac{h_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_0 \cdot S + h_2 \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_0 \cdot S}{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_0^2 \cdot S^2} = \\ &= \frac{\epsilon_0 \cdot S (h_1 \cdot \epsilon_2 + h_2 \cdot \epsilon_1)}{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_0^2 \cdot S^2} = \frac{h_1 \cdot \epsilon_2 + h_2 \cdot \epsilon_1}{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_0 \cdot S}. \end{aligned}$$

При послідовному з'єднанні заряди на всіх обкладках однакові, тобто:

$$Q = C_1 \cdot U_1 = C_2 \cdot U_2 = C \cdot U; \quad U_1 = U \cdot \frac{C}{C_1}; \quad U_2 = U \cdot \frac{C}{C_2}.$$

Тоді,

$$\begin{aligned} U_1 &= U \cdot \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_0 \cdot S}{h_1 \cdot \epsilon_2 + h_1 \cdot \epsilon_1}}{\frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_0 \cdot S}{h_1}} = U \cdot \frac{\epsilon_2 \cdot h_1}{h_1 \cdot \epsilon_2 + h_2 \cdot \epsilon_1} = \\ &= 1000 \cdot \frac{3,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{3,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 2,56 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = \frac{1000 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}}{16,44 \cdot 10^{-3}} = 377 \text{ В}. \end{aligned}$$

При послідовному з'єднанні

$$U = U_1 + U_2.$$

Звідси,  $U_2 = U - U_1 = 1000 - 377 = 623 \text{ В}$ .

Напруженість електричного поля в шарах:

$$E_1 = \frac{U_1}{h_1} = \frac{377}{2 \cdot 10^{-3}} = 188,5 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}; \quad E_2 = \frac{U_2}{h_2} = \frac{623}{4 \cdot 10^{-3}} = 155 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

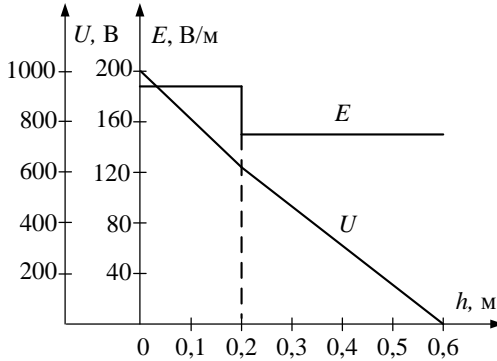


Рис.7.2. Картина електричного поля в двошаровому діелектрику

**Задача.** Визначити струм, що протікає через стержень з ебоніту  $d = 10$  мм і довжиною  $l = 30$  мм. Питомий об'ємний опір ебоніту  $\rho_v = 10^{14}$  Ом·м і питомий поверхневий опір  $\rho_s = 5 \cdot 10^{15}$  Ом. Стержень затиснутий між металевими електродами, які прикладені до торців стержня. Між електродами підтримується напруга  $U = 1$  кВ постійного струму. Визначити також втрати потужності у стержні.

#### Розв'язування

Визначаємо об'ємний і поверхневий опори:

$$R_s = \rho_s \cdot \frac{l}{d} = \frac{5 \cdot 10^{15} \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 15 \cdot 10^{15} \text{ Ом}.$$

$$R_v = \rho_v \cdot \frac{l}{S} = \rho_v \cdot \frac{4l}{\pi d^2} = \frac{10^{14} \cdot 4 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = \frac{120 \cdot 10^{11}}{314 \cdot 10^{-6}} = 3,8 \cdot 10^{16} \text{ Ом}.$$

Об'ємний і поверхневий струми діелектрика знаходимо згідно із законом Ома:

$$I_V = \frac{U}{R_V} = \frac{1000}{3,8 \cdot 10^{16}} = 2,63 \cdot 10^{-14} \text{ A}; \quad I_S = \frac{U}{R_S} = \frac{1000}{15 \cdot 10^{15}} = 6,66 \cdot 10^{-14} \text{ A}.$$

Загальний струм:

$$I = I_S + I_V = (2,63 + 6,66) \cdot 10^{-14} = 9,3 \cdot 10^{-14} \text{ A}.$$

Втрати потужності:

$$\Delta P = U \cdot I = 1000 \text{ В} \cdot 9,3 \cdot 10^{-14} \text{ А} \approx 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}.$$

**Задача.** Визначити ємність ізоляції коаксіального кабелю (в мікрофарадах на 1 м довжини кабелю) між внутрішнім і зовнішнім провідниками, а також діелектричні втрати (у ватах на 1 м довжини кабелю) при напрузі  $U = 100 \text{ В}$  і значеннях частоти  $f_1 = 800 \text{ КГц}$  та  $f_2 = 8 \text{ МГц}$  і питомі втрати ( $\text{Вт/м}^3$ ) при цих же частотах.

Кабель має суцільну поліетиленову ізоляцію і центральний провідник діаметром  $d_1 = 2,6 \text{ мм}$  та діаметр зовнішнього провідника  $d_2 = 9,4 \text{ мм}$ . Діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат поліетилену в діапазоні зміни частот вважати незмінними  $\varepsilon = 2,3$ ,  $\text{tg} \delta = 0,0003$ .

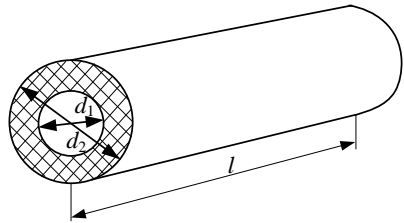


Рис. 7.3. Коаксіальний кабель

### Розв'язування

Приведена ємність кабелю:

$$K = 0,024 \cdot \frac{\varepsilon}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot 10^{-6} \frac{\Phi}{\text{м}} = 0,024 \cdot \frac{2,3}{\ln \frac{9,4}{2,6}} \cdot 10^{-6} \frac{\Phi}{\text{м}} = 0,043 \frac{\text{мк}\Phi}{\text{м}}.$$

Втрати потужності для частоти  $f = 800 \text{ кГц}$ :

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= U^2 \cdot K \cdot \omega_1 \cdot \text{tg} \delta = U^2 \cdot K \cdot 2\pi f_1 \cdot \text{tg} \delta = \\ &= 100^2 \cdot 0,043 \frac{\text{мк}\Phi}{\text{м}} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 800 \cdot 10^3 \text{ Гц} \cdot 0,0003 = 0,65 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}. \end{aligned}$$



Втрати потужності для частоти  $f = 8$  МГц:

$$\begin{aligned}\Delta P_2 &= U^2 \cdot K \cdot \omega_2 \cdot tg\delta = U^2 \cdot K \cdot 2\pi f_2 \cdot tg\delta = \\ &= 100^2 \cdot 0,043 \frac{мкФ}{м} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 10^6 \text{ Гц} \cdot 0,0003 = 6,5 \frac{Вт}{м}.\end{aligned}$$

Визначаємо ємність ділянки ізоляції:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2,3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{\ln \frac{9,4}{2,6}} = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Питомі втрати при частоті  $f_1$ :

$$\begin{aligned}\Delta p_1 &= \frac{U^2 \cdot C \cdot \omega_1 \cdot tg\delta}{V} = \frac{U^2 \cdot C \cdot 2\pi f_1 \cdot tg\delta}{V} = \\ &= \frac{100^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 800 \cdot 10^3 \cdot 0,0003}{64 \cdot 10^{-6}} = 23,5 \text{ Вт} / \text{м}^3.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta p_2 &= \frac{U^2 \cdot C \cdot \omega_2 \cdot tg\delta}{V} = \frac{U^2 \cdot C \cdot 2\pi f_2 \cdot tg\delta}{V} = \\ &= \frac{100^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 10^6 \cdot 0,0003}{64 \cdot 10^{-6}} = 235 \text{ Вт} / \text{м}^3.\end{aligned}$$

де  $V$  – об'єм ділянки ізоляції

$$V = \pi \left( \frac{d_2^2}{4} - \frac{d_1^2}{4} \right) \cdot l = 3,14 \left( \frac{9,4 \cdot 10^{-3}{}^2 - 2,6 \cdot 10^{-3}{}^2}{4} \right) \cdot 1 = 64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

**Задача.** Розрахувати для діелектрика з двома послідовно ввімкненими шарами для якого задано діаметр пластин (електродів)  $d = 8$  мм: а) ємність кожного шару; б) ємність всього конденсатора; в)  $tg\delta$  для кожного шару; г) діелектричні втрати всього конденсатора. Питомі об'ємні опори, товщини, діелектричні проникності першого і другого компонентів відповідно дорівнюють:  $\rho_{V1} = 10^{10}$  Ом·м,  $\rho_{V2} = 10^{11}$  Ом·м,  $h_1 = 10^{-3}$  м,  $h_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  м,  $\epsilon_1 = 2,8$ ,  $\epsilon_2 = 3,6$ .

*Розв'язування*

а) ємність кожного шару конденсатора:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{h_1} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \pi d^2}{4h_1} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,8\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3}^2}{4 \cdot 10^{-3}} \approx 1,25 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{h_2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 \pi d^2}{4h_2} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,6\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3}^2}{4 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \approx 0,8 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

б) ємність всього конденсатора:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_2 + C_1}{C_1 C_2};$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1,25 \cdot 10^{-12} \cdot 0,8 \cdot 10^{-12}}{1,25 \cdot 10^{-12} + 0,8 \cdot 10^{-12}} \approx 0,49 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

в)  $tg\delta$  для кожного шару:

$$tg\delta_1 = \frac{1}{C_1 \omega r_1} = \frac{1}{C_1 2\pi f r_1} = \frac{1}{1,25 \cdot 10^{-12} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 19,9 \cdot 10^{10}} \approx 0,013;$$

$$tg\delta_2 = \frac{1}{C_2 \omega r_2} = \frac{1}{C_2 2\pi f r_2} = \frac{1}{0,8 \cdot 10^{-12} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{12}} \approx 0,001,$$

де

$$r_1 = \rho_{V_1} h_1 \frac{4}{\pi d^2} = 10^{10} \cdot 10^{-3} \frac{4}{\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3}^2} \approx 20 \cdot 10^{10} \text{ Ом};$$

$$r_2 = \rho_{V_2} h_2 \frac{4}{\pi d^2} = 10^{11} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \frac{4}{\pi \cdot 8 \cdot 10^{-3}^2} = 4 \cdot 10^{12} \text{ Ом},$$

опори, що визначаються із схеми заміщення діелектрика (див. пункт 1.7).

г) діелектричні втрати всього конденсатора:

$$tg\delta = \frac{1}{C \omega r} = \frac{1}{C 2\pi f (r_1 + r_2)} = \frac{1}{0,49 \cdot 10^{-12} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot (20 \cdot 10^{10} + 4 \cdot 10^{12})} \approx 0,0015.$$

**Задача.** До зразка прямокутної форми із діелектричного матеріалу розміром  $a \times b$  ( $a = 20$  мм,  $b = 10$  мм) та товщиною  $h = 1$  мм прикладено постійну напругу  $U = 500$  В. Напруга підводиться до граней  $a$ ,  $b$ , що покриті шарами металу.

Відомо, що питомий об'ємний опір  $\rho_v = 0,5 \cdot 10^{16}$  Ом·м, питомий поверхневий опір  $\rho_s = 10^{16}$  Ом, діелектрична проникність  $\epsilon = 2$ , тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta = 0,0002$ .

Необхідно визначити: струм, потужність втрат енергії, питомі діелектричні втрати, питомі діелектричні втрати при ввімкненні зразка до постійної та змінної напруг з діючим значенням  $U_{\sim} = 500$  В при частотах  $f_1 = 50$  Гц та  $f_2 = 5$  МГц.

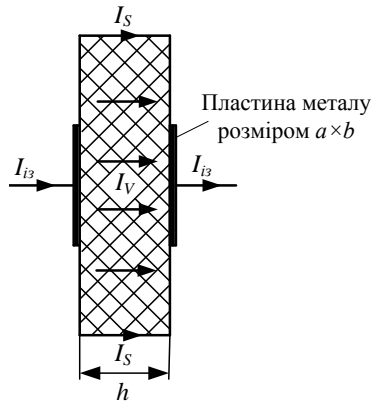


Рис.7.4. Ізоляційний зразок прямокутної форми

### Розв'язування

Об'ємний опір зразка прямокутної форми (рис.7.4) обчислюється за формулою

$$R_v = \rho_v \frac{h}{S} = \rho \frac{h}{a \cdot b} = 0,5 \cdot 10^{16} \frac{10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ Ом} ,$$

а поверхневий цього зразка

$$R_s = \rho_s \cdot \frac{h}{2(a+b)} = 10^{16} \cdot \frac{10^{-3}}{2(20 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3})} = 0,017 \text{ Ом} .$$

Загальний опір ізоляції знаходимо як паралельне ввімкнення опорів  $R_v$  та  $R_s$ .

$$R_{iz} = \frac{R_v \cdot R_s}{R_v + R_s} = \frac{2,5 \cdot 0,017 \cdot 10^{32}}{2,5 + 0,017 \cdot 10^{16}} = 169 \cdot 10^{12} \text{ Ом} .$$

Струм, що протікає через ділянку ізоляції

$$I_{iz} = \frac{U}{R_{iz}} = \frac{500}{169 \cdot 10^{12}} = 2,96 \cdot 10^{-12} \text{ А} .$$

Потужність втрат:

$$\Delta P = \frac{U^2}{R_{із}} = \frac{500^2}{169 \cdot 10^{12}} = 10^{-9} \text{ Вт.}$$

Питома потужність втрат у діелектрика:

$$\rho = \frac{\Delta P}{V} = \frac{\Delta P}{a \cdot b \cdot h} = \frac{10^{-9}}{20 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

У випадку дії змінної напруги потужність втрат у діелектрику визначається за формулою

$$\Delta P_{\approx} = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta.$$

Ємність ділянки ізоляції (конденсатора):

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{a \cdot b}{h} = 2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{20 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} = 3,54 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Повна та питома потужності втрат у діелектрику визначаються відповідно до частот напруги.

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= U^2 \cdot \omega_1 \cdot C \cdot \text{tg} \delta = U^2 \cdot 2 \cdot \pi f_1 \cdot C \cdot \text{tg} \delta = \\ &= 500^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3,54 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0002 = 55,5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт.} \end{aligned}$$

$$\Delta p_1 = \frac{\Delta P_1}{V} = \frac{55,5 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-7}} = 0,2775 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= U^2 \cdot \omega_2 \cdot C \cdot \text{tg} \delta = U^2 \cdot 2 \cdot \pi f_2 \cdot C \cdot \text{tg} \delta = \\ &= 500^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 3,54 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0002 = 5,55 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.} \end{aligned}$$

$$\Delta p_2 = \frac{P_2}{V} = \frac{5,55 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-7}} = 27500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

Тут об'єм діелектрика

$$V = a \cdot b \cdot h = 20 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10^{-9} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$$

**Задача.** Визначити величину пробивної напруги для пластинки текстоліту товщиною  $h = 20$  мм. Характеристики цього матеріалу: діелектрична проникність  $\varepsilon = 5$ ; тангенс кута діелектричних

втрат при  $t_1 = 20^\circ\text{C}$   $tg\delta_1 = 0,05$ , а при  $t_2 = 50^\circ\text{C}$   $tg\delta_2 = 0,1$ ; питома теплопровідність текстоліту  $\gamma_T = 0,12$  Вт/(м·К); коефіцієнт тепловіддачі в електроди  $\sigma = 2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Робоча температура діелектрика  $t = 40^\circ\text{C}$ . Задачу розв'язати для двох випадків: коли частота прикладеної напруги рівна  $f_1 = 50$  Гц і  $f_2 = 5$  кГц.

### Розв'язування

Для визначення пробивної напруги скористаємось формулою:

$$U_{np} = 3,82 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{\gamma_T}{f \cdot \varepsilon \cdot tg\delta_0 \cdot \alpha}} \cdot \varphi(c),$$

де  $tg\delta_0$  – втрати діелектрика при  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  діелектрика;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат (ТК<sub>tgδ</sub>);  $\varphi(c)$  – функція, значення якої знаходять за рис.1.37;  $c$  – аргумент, що обчислюється за формулою:

$$c = \frac{\gamma_{T1} \cdot \sigma \cdot h}{2\gamma_T \cdot \gamma_{T1} + \sigma \cdot l},$$

де  $\gamma_{T1}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу електродів;  $l$  – товщина електроду, м.

Розраховуємо коефіцієнт  $c$ , при цьому прийнявши, що товщина електродів  $l \approx 0$  і коефіцієнт теплопровідності матеріалу електродів (мідь)  $\gamma_{T1} = 390$  Вт/(м·К).

$$c = \frac{390 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,12 \cdot 390} = 0,166.$$

Отже, функція  $\varphi(c) = 0,15$ .

Знаходимо температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат.

$$\alpha = \frac{1}{tg\delta_1} \cdot \frac{tg\delta_2 - tg\delta_1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{0,05} \cdot \frac{0,1 - 0,05}{50 - 20} = 0,033 \text{ K}^{-1}.$$

При  $t = 40^\circ\text{C}$   $tg\delta \approx 0,08$ .

При частоті  $f_1 = 50$  Гц:

$$U_{np1} = 3,82 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{0,12}{50 \cdot 5 \cdot 0,08 \cdot 0,033}} \cdot 0,15 = 24,4 \text{ кВ}.$$

При частоті  $f_2 = 5000$  Гц:

$$U_{np2} = 3,82 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{0,12}{5000 \cdot 5 \cdot 0,08 \cdot 0,033}} \cdot 0,15 = 2,44 \text{ кВ.}$$

Напруженості поля в діелектрику при двох значеннях частоти:

$$E_{np1} = \frac{U_{np1}}{h} = \frac{24,4 \text{ кВ}}{20 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1,22 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}; \quad E_{np2} = \frac{U_{np2}}{h} = \frac{2,44 \text{ кВ}}{20 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 122 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

**Задача.** Циліндричний конденсатор є скляною трубкою з внутрішнім діаметром  $d_1 = 20$  мм і зовнішнім діаметром  $d_2 = 40$  мм, на якій розміщені електроди з осьовою довжиною  $l = 100$  мм. Характеристики скла:  $\varepsilon = 8$ ;  $\text{tg}\delta = 0,003$ . Напруга між обкладками конденсатора  $U = 2$  кВ, частота  $f = 1$  КГц. Визначте повні діелектричні втрати, а також питомі діелектричні втрати в точках: безпосередньо прилягаючих до внутрішнього та зовнішнього електродів і в середині товщини ізоляції (точки  $A, B, B$ ).

#### Розв'язування

Найбільші питомі втрати потужності будуть в точці  $A$ , найменші – в точці  $B$ .

Для розрахунку напруженостей скористаємось формулою:

$$E = \frac{0,434U}{x \cdot \lg \frac{r_2}{r_1}},$$

де  $x$  – координата відстані від осі конденсатора до досліджуваної точки.

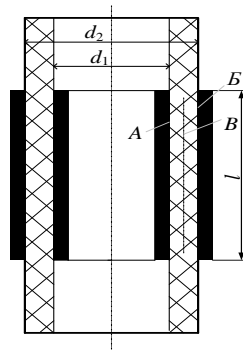


Рис.7.5. Циліндричний конденсатор

Для точки  $A$ :

$$E_A = \frac{0,434U}{r_1 \cdot \lg \frac{r_2}{r_1}} = \frac{0,434 \cdot 2000}{10 \cdot 10^{-3} \cdot \lg \frac{20}{10}} = 288 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Для точки Б:

$$E_B = \frac{0,434U}{r_2 \cdot \lg \frac{r_2}{r_1}} = \frac{0,434 \cdot 2000 \text{ В}}{20 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \lg \frac{20}{10}} = 144 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Для точки В:

$$E_B = \frac{0,434U}{\left(\frac{d_2 + d_1}{4}\right) \cdot \lg \frac{r_2}{r_1}} = \frac{0,434 \cdot 2000 \text{ В}}{15 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \lg \frac{20}{10}} = 216 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Ємність скляного конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 0,1}{\ln \frac{20}{10}} = 64 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Повні діелектричні втрати конденсатора:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta = U^2 \cdot 2\pi f \cdot C \cdot \text{tg} \delta = 2000^2 \cdot 6,28 \cdot 1000 \cdot 64 \cdot 10^{-12} = 1,6 \text{ Вт}.$$

Питомі діелектричні втрати:

В точці А:

$$p_A = \frac{P}{V} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \text{tg} \delta E_A^2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 8 \cdot 0,003 \cdot 288^2 = 110 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3};$$

В точці Б:

$$p_B = \frac{P}{V} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \text{tg} \delta E_B^2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 8 \cdot 0,003 \cdot 144^2 = 27 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3};$$

В точці В:

$$p_B = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \text{tg} \delta E_B^2 = 6,28 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 8 \cdot 0,003 \cdot 216^2 = 62 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

**Задача.** Конденсатор з діелектриком “полістирол” був заряджений до постійної напруги  $U_0 = 200 \text{ В}$ , після чого джерело напруги було вимкнено. Через 3 години різниця потенціалів на обкладках конденсатора стала рівною  $U = 40 \text{ В}$ . Визначити постійну часу саморозряду конденсатора і питомий опір його діелектрика.

*Розв'язування*

Для розрахунку скористаємось формулою:

$$U = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

де  $\tau$  – постійна саморозряду конденсатора, сек.

$$\tau = RC = \varepsilon\varepsilon_0\rho.$$

З вихідного рівняння визначаємо постійну саморозряду конденсатора.

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{U_0}; \quad -\frac{t}{\tau} = \ln \frac{U}{U_0};$$

$$\tau = \frac{-t}{\ln \frac{U}{U_0}} = \frac{-10800 \text{ сек}}{\ln \frac{40}{200}} = \frac{-10800}{-1,609} = 6712 \text{ сек.} \approx 1 \text{ год. } 52 \text{ хв.}$$

Тобто, за час  $\tau = 1$  год. 52 хв. напруга на конденсаторі зменшиться в  $e = 2,718$  раз.

Діелектрична проникність полістиролу  $\varepsilon = 2,5$ .

Звідси, питомий опір полістиролу дорівнює:

$$\rho = \frac{\tau}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} = \frac{6712 \text{ сек}}{2,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}} \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

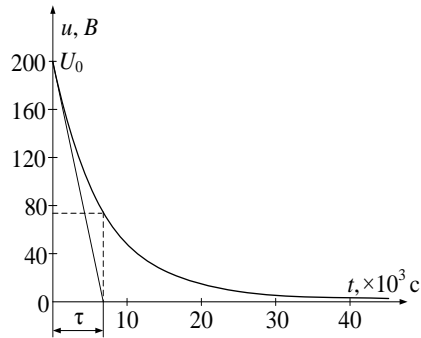


Рис.7.6. Графік саморозряду конденсатора

**Задача.** Коаксіальний кабель з радіусом внутрішньої жили  $r_1 = 2$  мм і зовнішньої оболонки  $r_2 = 4$  мм ввімкнений на постійну напругу  $U = 200$  В. Визначити струм, що протікає через недосконалу ізоляцію кабелю, якщо його довжина  $l = 10$  м, а питомий опір ізоляції  $\rho = 10^{12}$  Ом·м.



### Розв'язування

Використовуємо формулу для визначення опору ділянки ізоляції коаксіального кабелю:

$$R_{iz} = \rho \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot l} = \frac{10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \ln \frac{4}{2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \text{ м}} = 1,1 \cdot 10^{10} \text{ Ом}.$$

Струм, що протікає через ділянку ізоляції:

$$I = \frac{U}{R_{iz}} = \frac{200 \text{ В}}{1,1 \cdot 10^{10} \text{ Ом}} = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ А} = 1,8 \text{ нА}.$$

Потужність, що виділяється в ділянці ізоляції:

$$P = I^2 \cdot R_{iz} = (1,8 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{10} = 0,36 \text{ мкВт}.$$

**Задача.** Визначити втрати потужності в ізоляції на 100 м довжини мідного проводу перерізом  $S = 100 \text{ мм}^2$ , який має ізоляцію з полівінілхлориду товщиною  $h = 1,5 \text{ мм}$  і на зовнішній поверхні екран з мідного проводу.

До центрального провідника і заземлюючого екрана прикладена напруга синусоїдна  $U = 220 \text{ В}$ , з частотою  $f = 50 \text{ Гц}$ . Тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg} \delta = 0,005$ .

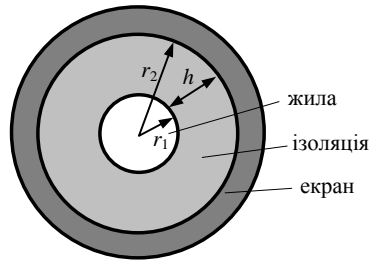


Рис.7.7. Переріз коаксіального кабелю

### Розв'язування

Визначаємо діаметр мідного провідника (жили):

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 100 \text{ мм}^2}{3,14}} = 11 \text{ мм}.$$

Визначаємо радіус зовнішнього провідника (екрана):



Визначаємо ємність ділянки ізоляції, прийнявши, що діелектрична проникність полівінілхлориду  $\epsilon = 3$ .

$$C = \frac{2\pi \cdot l \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln \frac{7}{5,5}} = 69 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Втрати потужності:

$$\Delta P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta = 220^2 \cdot 314 \cdot 69 \cdot 10^{-9} \cdot 0,005 = 5,2 \text{ мВт},$$

де  $\omega$  – кутова частота змінного струму  $\omega = 2\pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}$ .

**Задача.** Листовий ізоляційний матеріал «міканіт» складається з дев'яти шарів бакелітового лаку товщиною по 5 мкм, які служать діелектричним зв'язуванням, і десяти шарів, що містять частки слюди товщиною по 25 мкм. Визначити пробивну напругу листа міканіту в постійному електричному полі й у змінному електричному полі, вважаючи, що для слюди  $E_{np1} = 75 \text{ МВ/м}$ , для лаку  $E_{np2} = 50 \text{ МВ/м}$ .

*Розв'язування.*

При розрахунку пробивної напруги міканіту замінимо його двошаровим конденсатором (рис.7.8), сумарна товщина шарів слюди якого дорівнює  $h_1 = 25 \times 10 = 250 \text{ мкм}$ , а сумарна товщина шарів лаку  $h_2 = 5 \times 9 = 45 \text{ мкм}$ .

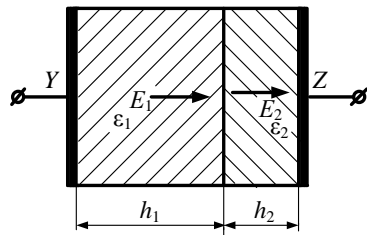


Рис.7.8. Двошаровий конденсатор

При впливі постійного поля відношення напруги на шарі зі слюди до напруги лакового покриття пропорційне відношенню їх опорів:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2 h_2} = \frac{10^{14} \cdot 250 \cdot 10^{-6}}{10^{11} \cdot 45 \cdot 10^{-6}} = 5,55 \cdot 10^3,$$

де  $\rho_1 = 10^{14} = \text{Ом} \cdot \text{м}$  – питомий опір міканіту,  $\rho_2 = 10^{11} = \text{Ом} \cdot \text{м}$  – питомий опір лакового покриття.

Напруженість поля в слюді значно більша, ніж в лакові, тому пробій міканіту відбудеться при зовнішній напрузі, що відповідає напруженості електричного поля в слюді

$$U_{np1} = E_{np1} \cdot \frac{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2}{\rho_1} = 75 \cdot 10^6 \cdot \frac{10^{14} \cdot 250 + 10^{11} \cdot 45 \cdot 10^{-6}}{10^{14}} = 18,7 \text{ кВ}.$$

При впливі змінного поля відношення напруги на шарові з міканіту до напруги лакового покриття пропорційне відношенню їх діелектричних проникностей:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_2 h_1}{\varepsilon_1 h_2}.$$

Діелектричні проникності слюди та лаку відповідно дорівнюють:  $\varepsilon_1 = 4$ ,  $\varepsilon_2 = 8$ .

Підставивши числові значення, одержимо

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4,0 \cdot 250}{8,0 \cdot 45} = 2,8.$$

У зв'язку з тим, що  $h_1 > h_2$  і  $E_1 > E_2$ , спочатку визначимо, при якій зовнішній напрузі відбудеться пробій лаку:

$$U_2 = E_{np2} \cdot \frac{\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1}{\varepsilon_1 \sqrt{2}} = 50 \cdot 10^6 \cdot \frac{4 \cdot 45 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 250 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot \sqrt{2}} = 9,66 \text{ кВ}.$$

Після пробою лаку вся зовнішня напруга буде прикладена до слюди, пробій якої відбудеться при збільшенні зовнішньої напруги до значення

$$U_{np1} = \frac{E_{np1}}{\sqrt{2}} \cdot h_1 = \frac{75 \cdot 10^6}{\sqrt{2}} \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 13,3 \text{ кВ}.$$

**Задача.** Багатшарова ізоляція складається з двох шарів різних діелектриків. Матеріал першого шару має діелектричну проникність  $\epsilon_1 = 3$ , питому провідність  $\gamma_1 = 2,5 \cdot 10^{-11}$  См/м. Матеріал другого шару – відповідно  $\epsilon_2 = 2,2$ ,  $\gamma_2 = 3,2 \cdot 10^{-8}$  См/м. Товщини першого і другого шарів:  $h_1 = 12$  мм,  $h_2 = 8$  мм, площа електродів  $S = 400$  см<sup>2</sup>. Нарисувати один з варіантів схеми заміщення двошарової ізоляції і розрахувати її параметри. Розрахувати і побудувати графічну залежність ємності ізоляції від частоти прикладеної напруги в діапазоні від 0 до 100 Гц.

*Розв'язання*

Для такого виду ізоляції найчастіше має місце міграційна поляризація, схема заміщення якої може мати два варіанти (рис.7.9).

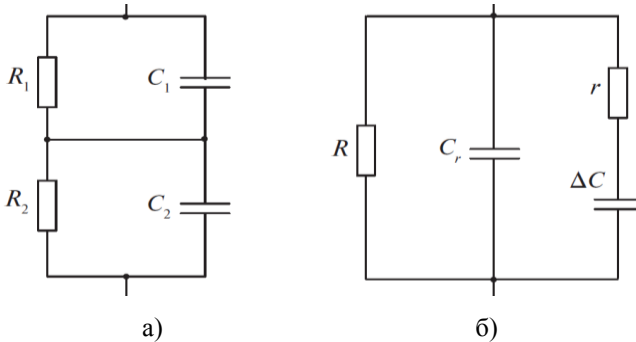


Рис.7.9. Можливі схеми заміщення двошарової ізоляції

Цей вид поляризації проявляється в твердих діелектриках неоднорідної структури. Така поляризація пов'язана з переміщенням електронів та іонів у межах шарів.

Електричні опори та ємності шарів ізоляції визначимо із схеми заміщення (рис.7.9, а).

$$R_1 = \frac{h_1}{\gamma_1 \cdot S} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-11} \cdot 400 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ Ом.}$$

$$R_2 = \frac{d_2}{\gamma_2 \cdot S} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{3,2 \cdot 10^{-8} \cdot 400 \cdot 10^{-4}} = 6,25 \cdot 10^6 \text{ Ом.}$$

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d_1} = \frac{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 400 \cdot 10^{-4}}{12 \cdot 10^{-3}} = 88,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{h_2} = \frac{2,2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 400 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-3}} = 97,4 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Схема, зображена на рис.7.9,б, складається з елементів, що відображають двошаровий діелектрик в цілому. Тут опір  $R$  характеризує провідність двошарового діелектрика, а ємність  $C$  визначається тільки розмірами та діелектричними проникностями шарів.

$$R = R_1 + R_2 = 1,2 \cdot 10^{10} + 6,25 \cdot 10^6 \approx 1,2 \cdot 10^{10} \text{ Ом.}$$

$$C_r = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{88,5 \cdot 10^{-12} \cdot 97,4 \cdot 10^{-12}}{88,5 \cdot 10^{-12} + 97,4 \cdot 10^{-12}} = 46,4 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Два інших параметри ( $r$ ,  $\Delta C$ ) визначимо з умови рівності повних опорів діелектрика [5]

$$r = \frac{R_1 R_2 R}{R_1 C_1 - R_2 C_2} = \frac{1,2 \cdot 10^{10} \cdot 6,25 \cdot 10^6 \cdot 1,2 \cdot 10^{10} \cdot [88,5 + 97,4 \cdot 10^{-12}]^2}{1,2 \cdot 10^{10} \cdot 88,5 \cdot 10^{-12} - 6,25 \cdot 10^6 \cdot 97,4 \cdot 10^{-12}} = 27,6 \cdot 10^6 \text{ Ом.}$$

$$\Delta C = \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{R^2} = \frac{1,2 \cdot 10^{10} \cdot 88,5 \cdot 10^{-12} - 6,25 \cdot 10^6 \cdot 97,4 \cdot 10^{-12}}{1,2 \cdot 10^{10} \cdot 88,5 \cdot 10^{-12} + 97,4 \cdot 10^{-12}} = 42 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

При довготривалій дії постійної напруги  $U_0$  внаслідок наявності провідності на межі шарів буде нагромаджуватись заряд абсорбції  $Q_{abc}$ , що є причиною міграційної поляризації.

$$|Q_{abc}| = |Q_1 - Q_2| = U_0 \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{R}.$$

Заряд абсорбції буде діяти лише при дотриманні умови

$$R_1 C_1 \neq R_2 C_2.$$

Умова неоднорідності двошарової ізоляції буде мати такий вигляд:

$$\frac{\varepsilon_1}{\gamma_1} \neq \frac{\varepsilon_2}{\gamma_2}.$$

При прикладенні до двошарового діелектрика змінної напруги ємність неоднорідного діелектрика залежить від частоти прикладеної напруги

$$C_{\omega} = C_r + \Delta C \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 T^2} = 46,35 \cdot 10^{-12} + \frac{42 \cdot 10^{-12}}{1 + 0,001 \cdot \omega^2},$$

де  $\omega$  – кутова частота прикладеної напруги,  $T$  – постійна часу кола, с.

$$T = R \cdot \Delta C = \frac{R_1 R_2 \cdot C_1 + C_2}{R} = \frac{1,2 \cdot 10^{10} \cdot 6,25 \cdot 10^6 \cdot 88,5 + 97,35 \cdot 10^{-12}}{1,2 \cdot 10^{10}} = 10^{-3} \text{ с.}$$

Задаючись значеннями частоти від 0 Гц до 100 Гц розрахуємо і будемо залежність  $C = f(\omega)$ .

$f$	Гц	0	20	40
$\omega$	с <sup>-1</sup>	0	125,6	251,2
$C$	пФ	$\infty$	48,85	47
$f$	Гц	60	80	100
$\omega$	с <sup>-1</sup>	376,8	502,4	628
$C$	пФ	46,64	46,51	46,45

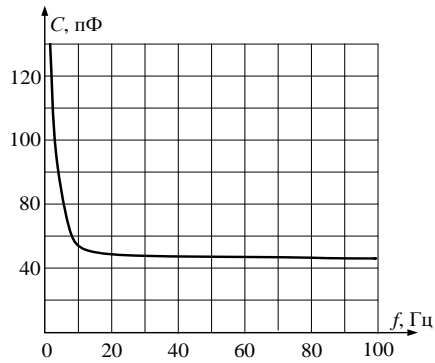


Рис. 7.10. Залежність  $C = f(\omega)$

**Задача.** Заданий одножильний маслонаповнений кабель із заземленою свинцевою оболонкою. Довжина кабелю дорівнює  $l = 1000$  м, радіус струмопровідної жили  $r_1 = 2$  мм і радіус зовнішньої оболонки  $r_2 = 10$  мм. Діелектрична проникність масла  $\epsilon = 2,5$ . Кабель розрахований на робочу напругу  $U = 27,5$  кВ.

Визначити ємність кабелю і характер зміни напруженості електричного поля біля поверхні струмопровідної жили при збільшенні її радіуса від  $r_1$  до  $r_2$ . Побудувати розраховану залежність  $E = f(x)$ .

#### Розв'язання

Коаксіальний кабель можна розглядати як циліндричний конденсатор. Відомо, що поле циліндричного конденсатора плос-

копаралельне і характеризується осовою симетрією. Причому еквіпотенціальні поверхні, потенціал електричного поля у всіх точках якої є однаковим, являють собою коаксіальні циліндри.

За теоремою Гаусса напруженість електричного поля циліндричного конденсатора в шарі з радіусом  $r_x$  дорівнює

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon \varepsilon_0 2\pi r_x l},$$

де  $Q$  – заряд, Кл,  $\varepsilon_0$  – електрична постійна вакууму, Ф/м,  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність ізоляції (масла),  $r_x$  – відстань від центра осі жили до точки  $x$ , м,  $l$  – довжина конденсатора, м.

Ємність для циліндричного конденсатора визначається за відомою формулою

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1000}{\ln \frac{10}{2}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-6}}{1,609} = 86,35 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Ураховуючи, що заряд  $Q = C \cdot U$  і підставляючи ємність у формулу Гаусса, отримуємо

$$E_x = \frac{U}{r_x \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = 0,434 \cdot \frac{U}{r_x \cdot \lg \frac{r_2}{r_1}} = 0,434 \cdot \frac{27500}{r_x \cdot \lg \frac{10}{2}} = \frac{17100}{r_x}.$$

Задаючись значеннями  $r_x$  (вважаючи, що  $r_x = r_1 + x$ ), розраховуємо значення напруженості поля і результати заносимо у таблицю

$r_x$ , М	2	3	4	5	6
$E_x$ , В/м	553	700	276	421	851
$r_x$ , М	7	8	9	10	
$E_x$ , В/м	443	138	900	10	

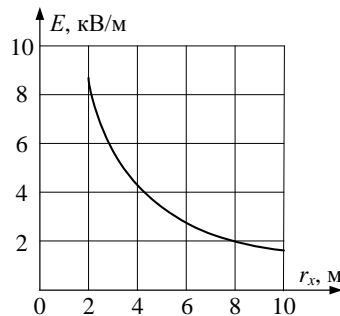


Рис.7.11. Розподіл напруженості поля в кабелі

**Задача.** Побудуйте графік залежності температурного коефіцієнта діелектричної проникності від температури  $\alpha_\varepsilon = f(T)$  для плівки ПЕТ, використовуючи залежність  $\varepsilon = f(T)$ , наведену на рис.7.12.

*Розв'язування.*

Задачу розв'язуємо графічним методом. У точках  $-60, -40, -20, 0, 20, 40, 60, 80$  °С проводимо дотичні до залежності  $\varepsilon = f(T)$ .

Використавши формулу температурного коефіцієнта діелектричної проникності для цих точок, розраховуємо  $TK_\varepsilon$  ( $\alpha_\varepsilon$ ). Для прикладу розрахуємо одну точку ( $-20$  °С), а інші занесемо в таблицю.

$$\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} = \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{T_1 - T_2} = \frac{1}{3,2} \cdot \frac{3,26 - 3,2}{-40 - 0} = -5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

$T, \text{°C}$	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
$\alpha_\varepsilon \times 10^{-4}, \text{K}^{-1}$	13	9	-5	-14	-4	8	24	50

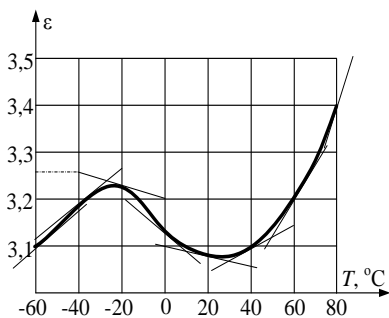


Рис.7.12. Залежність  $\varepsilon = f(T)$

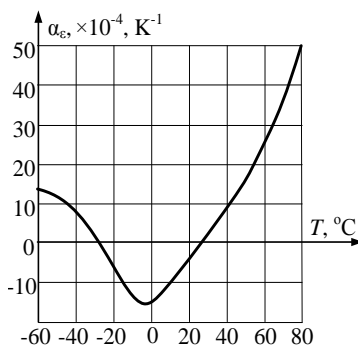


Рис.7.13. Розрахована залежність  $\alpha_\varepsilon = f(T)$

**Задача.** Зобразити і пояснити залежності  $\varepsilon$  та  $\text{tg}\delta$  від температури для полярного діелектрика при різних частотах, а також вказати відомі види поляризації полярних полімерів.

*Розв'язування*

У полярних діелектриків в низькотемпературній області орієнтація молекул в більшості випадків неможлива. При підвищенні температури можливість орієнтації диполів полегшується, що веде до збільшення діелектричної проникності  $\varepsilon$ . Але при подальшому підвищенні температури відбувається посилення хаотичних тепло-



вих коливань молекул, що зменшує ступінь впорядкованості їх орієнтації. Це призводить до того, що крива йде через максимум. З підвищенням частоти дипольні максимуми в температурному діапазоні зміщуються в область більш високих температур. Це пояснюється тим, що із збільшенням температур зменшується в'язкість, завдяки чому зменшується час релаксації. На рис.7.14 показано залежність діелектричної проникності полярного діелектрика від температури при різних частотах.

Дипольні молекули, слідуючи за зміною електричного поля, повертаються у в'язкому середовищі і викликають втрати електричної енергії на тертя з виділенням теплоти. При малій температурі молекули не можуть слідувати за зміною електричного поля, тому  $tg\delta$  малий. Проте при зростанні температури можливість орієнтації збільшується, і при деякому значенні в'язкості і температури орієнтація відбувається вільно і досягає свого максимуму.

Потім в'язкість стає настільки малою, що орієнтація диполів відбувається практично без тертя. Втрати в цьому випадку малі. При підвищенні частоти максимум  $tg\delta$  зміщується в область більш високої температури: велика частота вимагає меншого часу релаксації, необхідного для отримання максимуму кута втрат, а для зменшення часу релаксації необхідне зниження в'язкості, тобто підвищення температури. На рис.7.15 показано залежність діелектричних втрат полярного діелектрика від температури при різних частотах.

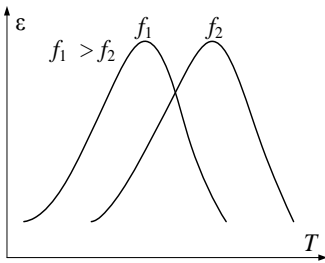


Рис.7.14. Залежність  $\epsilon = f(T)$

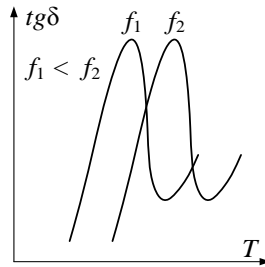


Рис.7.15. Залежність  $tg\delta = f(T)$

**Задача.** При нагріванні опір проводу із: а) міді; б) сталі; в) олова; г) манганіну збільшився на 15%. Визначити, до якої температури був нагрітий кожний провідник, якщо  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

*Розв'язування*

Запишемо залежність зміни опору від температури.

$$R_1 = R_0(1 + \alpha_R(T_1 - T_0)),$$

де  $R_1, R_0$  – опори проводу при  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  і при  $T_1$ ;  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $T_1$  – температура нагрітого проводу.

За умовою задачі  $R_1 = R_0 + 0,15R_0 = 1,15R_0$ .

З вихідного рівняння визначимо температуру  $T_1$ .

$$1 + \alpha_R(T_1 - T_0) = \frac{R_1}{R_0}; \quad \alpha_R(T_1 - T_0) = \frac{R_1}{R_0} - 1;$$

$$T_1 - T_0 = \frac{\frac{R_1}{R_0} - 1}{\alpha_R}; \quad T_1 = T_0 + \frac{\frac{R_1}{R_0} - 1}{\alpha_R} = T_0 + \frac{\left(\frac{1,15R_0}{R_0}\right) - 1}{\alpha_R} = T_0 + \frac{0,15}{\alpha_R},$$

де  $\alpha_R$  – температурний коефіцієнт опору ( $\text{K}^{-1}$ ).

За умовою задачі: для міді:  $\alpha_{RCu} = 0,0041 \text{ K}^{-1}$ ; для сталі (заліза):  $\alpha_{RFe} = 0,006 \text{ K}^{-1}$ ; для олова:  $\alpha_{RPb} = 0,0044 \text{ K}^{-1}$ ; для манганіну:  $\alpha_{RMa} = 0,00006 \text{ K}^{-1}$ .

Підставляючи значення  $\alpha_R$  у формулу для визначення температури, визначаємо температуру  $T_1$  для кожного нагрітого матеріалу.

Відповідь:  $T_{1Cu} = 56^\circ\text{C}$ ;  $T_{1Cm} = 45^\circ\text{C}$ ;  $T_{1Pb} = 54^\circ\text{C}$ ;  $T_{1Ma} = 2520^\circ\text{C}$ .

**Задача.** Визначити розміри і вагу біметалевого (сталь-мідь) провідника довжиною 1 м і порівняти ці дані з алюмінієвим провідником перерізом  $6 \text{ мм}^2$ . Біметалевий провідник має таку саму провідність і довжину, що й алюмінієвий, а переріз міді в ньому дорівнює 40 %, переріз сталі – 60 %.

#### Розв'язування

З довідника [2] вибираємо значення питомих електричних провідностей для міді, алюмінію та сталі.

$$\gamma_{Al} = 35 \cdot 10^6 \text{ См/м}; \quad \gamma_{Cu} = 58,8 \cdot 10^6 \text{ См/м}; \quad \gamma_{Fe} = 10 \cdot 10^6 \text{ См/м}.$$

Еквівалентна провідність біметалу буде дорівнювати:

$$\gamma_{Cu-Fe} = 0,4\gamma_{Cu} + 0,6\gamma_{Fe}.$$

По умові задачі повні провідності однакові. Отже,

$$G_{Al} = \frac{\gamma_{Al} \cdot S_{Al}}{l_{Al}}; \quad G_{Cu-Fe} = \frac{\gamma_{Cu-Fe} \cdot S_{Cu-Fe}}{l_{Cu-Fe}}; \quad G_{Al} = G_{Cu-Fe}.$$

Прирівняємо праві частини рівнянь і з них визначимо переріз біметалевого провідника.

$$\frac{\gamma_{Al} \cdot S_{Al}}{l_{Al}} = \frac{\gamma_{Cu-Fe} \cdot S_{Cu-Fe}}{l_{Cu-Fe}}; \quad \gamma_{Cu-Fe} \cdot S_{Cu-Fe} = \gamma_{Al} \cdot S_{Al};$$

$$S_{Cu-Fe} = \frac{\gamma_{Al} \cdot S_{Al}}{\gamma_{Cu-Fe}} = \frac{35 \cdot 10^6 \text{ См} \cdot \text{м} \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{0,4 \cdot 58,8 \cdot 10^6 \text{ См} \cdot \text{м} + 0,6 \cdot 10 \cdot 10^6 \text{ См} \cdot \text{м}} = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Діаметр алюмінієвого провідника:

$$d_{Al} = \sqrt{\frac{4S_{Al}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6 \text{ мм}^2}{3,14}} = 2,7 \text{ мм};$$

Діаметр біметалевого провідника:

$$d_{Cu-Fe} = \sqrt{\frac{4S_{Cu-Fe}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7,1 \text{ мм}^2}{3,14}} = 3 \text{ мм}.$$

Шукаємо вагу провідників:

$$m_{Al} = V \cdot D = \pi \left( \frac{d_{Al}}{2} \right)^2 \cdot l \cdot D_{Al} = 3,14 \cdot 1,35^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 2700 = 0,016 \text{ кг}.$$

Густина біметалу:

$$D_{Cu-Fe} = 0,4D_{Cu} + 0,6D_{Fe} = 0,4 \cdot 7870 + 0,6 \cdot 8940 = 8515 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Вага біметалевого провідника:

$$m_{Cu-Fe} = VD = \pi \left( \frac{d_{Cu-Fe}}{2} \right)^2 \cdot l \cdot D_{Cu-Fe} = 3,14 \cdot 1,5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 8515 = 0,06 \text{ кг}.$$

**Задача.** При нагріванні проводу з манганіну довжиною  $l = 1,5$  м і діаметром  $d = 0,1$  м від  $t_0 = 20$  °С до  $t_1 = 100$  °С його опір зменшується на 0,07 Ом, а довжина зростає на 0,16%. Визначити температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_p$  та питому теплопровідність при  $t_0 = 20$  °С. При кімнатній температурі для манганіну питомий опір  $\rho = 0,47$  мкОм·м.

*Розв'язання*

Знаходимо опір проводу при  $t_0 = 20$  °С.

$$R_0 = \rho_0 \frac{l_0}{S} = \rho_0 \frac{l_0}{\frac{\pi d^2}{4}} = \rho_0 \frac{4l_0}{\pi d^2} = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 1,5}{3,14 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}{}^2} = 89,8 \text{ Ом.}$$

Опір при температурі  $t_1 = 100$  °С:

$$R_1 = R_0 - \Delta R = 89,8 - 0,07 = 89,73 \text{ Ом.}$$

Враховуючи температурну залежність зміни опору, запишемо

$$R_1 = R_0 [1 + \alpha_R (t_1 - t_0)],$$

визначимо температурний коефіцієнт опору  $\alpha_R$ .

$$\alpha_R = \frac{\frac{R_1}{R_0} - 1}{t_1 - t_0} = \frac{\frac{89,73}{89,8} - 1}{100 - 20} = \frac{-0,00078}{80} = -0,00001 = -10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Температурний коефіцієнт лінійного розширення знаходимо аналогічно

$$l_1 = l_0 [1 + \alpha_l (t_1 - t_0)]$$

$$\alpha_R = \frac{\frac{l_1}{l_0} - 1}{t_1 - t_0} = \frac{\frac{1,0016 \cdot l_0}{l_0} - 1}{t_1 - t_0} = \frac{\frac{1,5024}{100 - 20} - 1}{100 - 20} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Температурні коефіцієнти пов'язані таким співвідношенням

$$\alpha_p = \alpha_R + \alpha_l = -10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} = 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Згідно з рівнянням [3]

$$\frac{\gamma_T}{\gamma} = L_0 \cdot T$$

$$\gamma_T = L_0 \cdot T \cdot \gamma = \frac{L_0 \cdot T_1}{\rho_0} = \frac{L_0 \cdot t_1 + 273,15}{\rho_0} = \frac{2,45 \cdot 10^{-8} \cdot 373,15}{0,47 \cdot 10^{-6}} = 19,45 \frac{\text{Вм}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

**Задача.** Температура переходу олова в надпровідний стан при відсутності магнітного поля дорівнює 3,7 К. Напруженість критичного поля при  $T = 0$  К дорівнює  $2,4 \cdot 10^4$  А/м. Визначити максимально допустимий струм при  $T = 2$  К для провідника діаметром  $d = 1$  мм, який виготовлений з надпровідного олова. Також визначити для даної температури діаметр провідника, по якому може протікати струм силою 100 А без руйнування надпровідного стану.

*Розв'язування.*

Залежність критичного поля  $H_c$  від температури визначається виразом:

$$H_c(T) = H_{c0} \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right),$$

де  $T_c$  – критична температура переходу надпровідника в нормальний стан,  $H_{c0}$  – значення напруженості критичного поля при  $T = 0$  К.

Тоді для олова

$$H_c(2\text{К}) = 2,4 \cdot 10^4 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2}{3,7} \right)^2 \right] = 1,7 \cdot 10^4 \text{ А/м}.$$

Максимальний струм обмежується критичним значенням напруженості магнітного поля на поверхні зразка. Для циліндричного провідника

$$I_c = \pi d H_c(T) = 3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 1,7 \cdot 10^4 = 53,4 \text{ А}.$$

Визначаємо діаметр провідника, по якому може протікати струм 100 А

$$d' = \frac{I}{\pi H_c(T)} = \frac{100}{3,14 \cdot 1,7 \cdot 10^4} = 1,87 \text{ мм.}$$

**Задача.** Електрична освітлювальна установка, що має потужність  $P = 1100$  Вт, живиться від електричної мережі напругою  $U = 220$  В. Лінія, довжиною  $l = 5$  м, виконана проводами, що мають гранично допустиму температуру нагріву  $\theta_{ep} = 80$  °С і коефіцієнт теплопередачі матеріалу проводів  $\sigma = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Переріз жили проводу  $S = 0,75$  мм<sup>2</sup>. Розрахувати допустиму за умовами нагріву густину струму і допустимий струм, порівняти його з робочим струмом і визначити надійність та економічність роботи установки з даними провідниками. Матеріал жили проводу – мідь, матеріал ізоляції – поліетилен.

#### *Розв'язання*

Згідно ПУЕ провідники будь-якого призначення повинні задовольняти вимоги щодо гранично допустимого нагріву. Кількість теплоти, що виділяється в проводі опором  $R$  при протіканні через нього струму  $I$ , визначається виразом

$$W = I^2 R t.$$

Частина цього тепла йде на підвищення температури проводу, а інша частина розсіюється в навколишньому середовищі. В усталеному тепловому стані кількість розсіюваного тепла буде дорівнювати кількості тепла, що виділяється при дії струму.

Усталена температура провідника

$$\theta_{уст} = \theta_{ep} - \theta_{навк} = 80 - 20 = 60 \text{ °С.}$$

Рівняння теплового балансу має такий вигляд [3]

$$I^2 R = \sigma S_{II} \Theta_{уст},$$

де  $S_{II}$  – площа бічної поверхні охолодження провідника, м<sup>2</sup>,  $\Theta_{уст}$  – усталена різниця температур проводу і навколишнього середовища  $\Theta_{уст} = \theta_{ep} - \theta_{навк}$ .

Визначаємо опір провідника через його геометричні розміри і параметр матеріалу жили

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м} \cdot \frac{5 \text{ м}}{0,75 \cdot 10^{-6}} = 0,11 \text{ Ом}.$$

При нагріванні опір провідника зростає.

Зміна питомого опору провідника при зміні температури визначається з рівняння

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_p (\theta_2 - \theta_1)] = 0,017 \cdot 10^{-6} [1 + 4,3 \cdot 10^{-3} (80 - 20)] = 0,021 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м}.$$

Тут  $\alpha_p$  – температурний коефіцієнт питомого опору міді (вибирається з довідників).

Перепишемо рівняння теплового балансу в іншому вигляді, врахувавши, що густина струму  $j = I/S$ .

$$j^2 S^2 \rho \frac{l}{S} = \sigma S_{II} \theta_{уст}; \quad \Rightarrow \quad j^2 S \rho l = \sigma \pi d l \theta_{уст}.$$

Тут  $S$  – площа поперечного перерізу жили провідника.

$$S_{II} = \pi d l = 3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 5 \text{ м} = 15,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

де  $d$  – діаметр жили провідника

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 1 \text{ мм}.$$

Допустима густина струму  $j_{дон}$  при зміні температури від  $\theta_{уст}$  до  $\theta_{сп}$

$$j_{дон} = \sqrt{\frac{\sigma \pi d l \theta_{уст}}{\frac{\pi d^2}{4} \rho_2 l}} = \sqrt{\frac{4 \sigma \theta_{уст}}{\rho_2 d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10 \cdot 60}{0,021 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}} = 10,7 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

Допустимий струм провідника визначається із співвідношення

$$I_{дон} = j_{дон} \cdot S = 10,7 \cdot 0,75 = 8 \text{ А}.$$

Робочий струм провідника

$$I_{ном} = \frac{P}{U} = \frac{1100 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} = 5 \text{ А}.$$

Допустимий струм провідника більший за номінальний (робочий), а тому перегріву ізоляції матеріалу проводів не буде і освітлювальна установка буде працювати надійно.

**Задача.** Визначити енергію активації телуру, якщо його питома електропровідність зростає у 5 разів із збільшенням температури від 300 К до 400 К.

*Розв'язування*

Залежність питомої електропровідності напівпровідника від температури визначається виразом

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

де  $\gamma_0$  – коефіцієнт, характерний для даного напівпровідника;  $k$  – постійна Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град.);  $T$  – абсолютна температура;  $\Delta E$  – енергія активації даного напівпровідника.

У відповідності до вихідного рівняння питома електропровідність телуру при температурі  $T_1$  становитиме:

$$\gamma_1 = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT_1}},$$

а при  $T_2$ :

$$\gamma_2 = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT_2}}.$$

Поділимо рівняння почленно одне на одне:



Тоді

$$\ln \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = -\frac{\Delta E}{2k} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = \ln 5.$$

$$\Delta E = \frac{\ln 5 \cdot 2k}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = \frac{\ln 5 \cdot 2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}}{\frac{1}{300} - \frac{1}{400}} = 0,528 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,33 \text{ eВ}.$$



**Задача.** Визначити рухливість основних носіїв заряду (дірок) у пластинці кремнію товщиною  $h = 1$  мм, розміщеній у поперечному магнітному полі з індукцією  $B = 1$  Тл, при струмі  $I = 5$  мА, що протікає вздовж зразка. Холлівська різниця потенціалів  $\Delta\varphi_H = 1,83$  мВ. Питомий опір кремнію  $\rho = 8,93 \cdot 10^{-3}$  Ом·м.

З виразу для питомого опору для напівпровідника з дірковою провідністю:

$$\frac{1}{\rho} = q_p n_p \mu_p$$

знайдемо рухливість носіїв:

$$\mu_p = \frac{1}{\rho q_p n_p},$$

де  $q_p$  – заряд дірки ( $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).

Знайдемо концентрацію дірок  $n_p$  [5]:

$$n_p = \frac{k}{q_p \cdot \Delta\varphi_H} \cdot \frac{IB}{a},$$

де  $k = \frac{3\pi}{8}$  – коефіцієнт, характерний для кристалу типу алмазу.

Отже,

$$\mu_p = \frac{\Delta\varphi_H \cdot a}{\rho \cdot k \cdot I \cdot B} = \frac{1,83 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \cdot 8}{8,93 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 3,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

**Задача.** Концентрація носіїв у кремнію рівна  $n = 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Рухливість електронів і дірок – відповідно  $\mu_n = 0,15$  м<sup>2</sup>/В·с,  $\mu_p = 0,05$  м<sup>2</sup>/В·с. Визначити електричний опір кремнієвого стержня довжиною  $l = 5$  см і площею поперечного перерізу  $S = 2$  мм<sup>2</sup>.

Електричний опір напівпровідника визначається:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де  $\rho$  – питомий опір кремнію.

Питомий опір напівпровідника з електронною та дірковою провідністю визначається:

$$\frac{1}{\rho} = q \cdot n \cdot \mu_n + \mu_p,$$

де  $q$  – заряд носія струму.

Звідси – опір  $R$  кремнієвого стрижня:

$$R = \frac{l}{qnS(\mu_n + \mu_p)} = \frac{0,05}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{16} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,15 + 0,5)} = 1,56 \cdot 10^5 \text{ Ом.}$$

**Задача.** Тонка пластинка кремнію шириною  $b = 2$  см розміщена перпендикулярно до силових ліній однорідного магнітного поля з індукцією  $B = 0,5$  Тл. При густині струму  $j = 2$  мкА/мм<sup>2</sup>, що протікає вздовж пластинки, холлівська різниця потенціалів  $\Delta\phi_H = 2,8$  В. Визначити концентрацію носіїв струму.

Холлівська різниця потенціалів визначається виразом:

$$\Delta\phi_H = \frac{k}{qn} \cdot \frac{IB}{a},$$

де  $k = \frac{3\pi}{8}$  – коефіцієнт, характерний для кристалу типу алмазу;  $a$  –

товщина пластинки;  $I$  – сила струму, що протікає через пластинку.

З вихідного рівняння визначимо концентрацію носіїв струму:

$$n = \frac{k}{q \cdot \Delta\phi_H} \cdot \frac{IB}{a}.$$

Враховуючи, що густина струму

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{ab},$$

знайдемо силу струму:

$$I = j \cdot a \cdot b$$

і підставимо його в рівняння для визначення концентрації носіїв струму

$$n = \frac{3\pi}{8q \cdot \Delta\varphi_H} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot B}{a} = \frac{3\pi \cdot j \cdot b \cdot B}{8q \cdot \Delta\varphi_H} = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5}{8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,8} = 5,26 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}.$$

**Задача.** Розрахувати та побудувати для магнітотвердого матеріалу залежність магнітної індукції  $B$  від питомої магнітної енергії  $W_L$  (Дж/м<sup>3</sup>), якщо задана залежність  $B = B(H)$ .

*Розв'язування.*

Якщо магнітопровід замкнений, то магнітна енергія його дорівнює нулю. Магнітна енергія реалізується у повітряному проміжку цього магнітопроводу.

Складаємо таблицю, де визначимо енергію для всіх значень  $H$ .

$$W_L = \frac{B \cdot H}{2}$$

$H \times 10^3$ , А/м	0	1	2	3	4	5	5,5
$B$ , Тл	1,1	1,05	0,98	0,9	0,75	0,35	0
$W_L$ (Дж/м <sup>3</sup> )	0	0,525	0,98	1,35	1,5	0,875	0

На рис.7.16 побудуємо два графіки:  $B = B(H)$  та  $B = B(W_L)$ , потім визначимо  $B$  при  $W_{Lmax}$ .

При  $B = 0,75$  Тл,  $H = 4000$  А/м, маємо  $W_{Lmax} = 1,5$  Дж/м<sup>3</sup>.

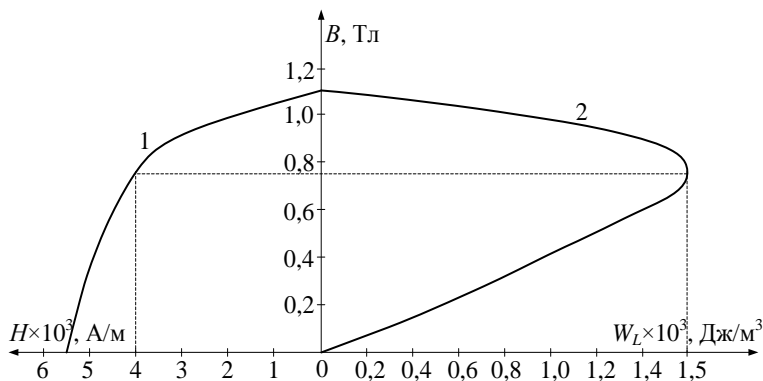


Рис.7.16. Криві розмагнічування (1) і магнітної енергії в повітряному проміжку (2) постійного магніту

**Задача.** Розрахувати та побудувати залежність  $\mu = \mu(H)$  для магнітом'якого матеріалу, якщо задана характеристика намагнічування  $B = B(H)$ .

*Розв'язування*

Магнітна індукція, що визначається з кривої намагнічування  $B = B(H)$  за формулою

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H.$$

Звідси – відносна магнітна проникність дорівнює

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}.$$

Очевидно, що магнітна проникність пропорційна крутизни кривої  $B = B(H)$  і при деякому значенні вона досягає свого максимального значення і далі в міру насичення матеріалу зменшується.

$H$ , кА/м	0	0,5	1	2,5	5	10	30
$B$ , Тл	0	1,6	1,7	1,85	1,9	1,95	2
$\mu$ , в.о.	0	2548	1354	589	306	155	53

Складаємо таблицю, де занесено  $B(H)$ , далі заносимо дані розрахунку  $\mu(H)$  і будуємо графіки. По горизонтальній осі відкладаємо напруженість магнітного поля  $H$ , кА/м, а по вертикальній осі відкладаємо магнітну індукцію  $B$ , Тл і магнітну проникність  $\mu$ .

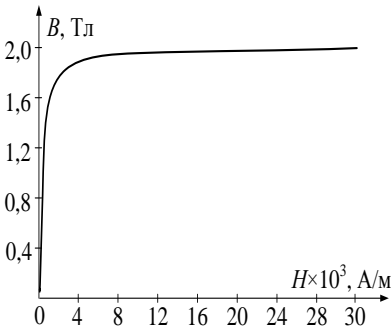


Рис.7.14. Залежність  $B = B(H)$

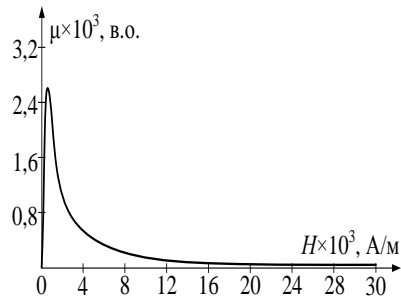


Рис.7.15. Залежність  $\mu = \mu(H)$

**Задача.** Котушка індуктивності (рис.7.17) має  $w = 400$  витків мідного ізольованого лаком проводу ( $\rho_{cu} = 0,017$  мкОм·м), що намотаний на діелектричний циліндр діаметром  $D = 1,5$  см. Через котушку протікає змінний струм  $I = 0,2$  А з частотою 1 МГц. Визначити мінімальний діаметр проводу, з якого може бути виготовлена котушка, якщо допустима густина струму в обмотці  $j = 2,5$  А/мм<sup>2</sup>, потужність, що виділяється в обмотці, мінімальну товщину шару лакової ізоляції, якщо електрична міцність півки лаку  $E_{np} = 3$  кВ/мм. Запас за електричною міцністю лакової ізоляції  $K = 10$ .

*Розв'язування*

Визначаємо площу поперечного перерізу мідного провідника

$$S = \frac{I}{j} = \frac{0,2}{2,5} = 0,08 \text{ мм}^2.$$

Діаметр проводу котушки

$$S = \frac{\pi d^2}{4};$$

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,08}{3,14}} = 0,32 \text{ мм}.$$

Довжина обмотки

$$l = l_{\text{витка}} \cdot w = \pi D w = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 400 = 18,85 \text{ м}.$$

Активний опір обмотки

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,017 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{18,85}{0,08 \cdot 10^{-6}} = 4 \text{ Ом},$$

Індуктивність котушки

$$L = \mu \mu_0 \frac{w^2 S_k}{l_k} = \mu \mu_0 \cdot \frac{w^2 \cdot \pi D^2}{4 \cdot w \cdot d} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{400 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}^2}{4 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3}} = 0,28 \text{ мГн},$$

де магнітна проникність  $\mu = 1$  (діелектричний циліндр),  $S_k$ ,  $l_k$  – площа поперечного перерізу і довжина котушки.

Знаходимо індуктивний опір котушки

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot 0,28 \cdot 10^{-3} = 1760 \text{ Ом}.$$

Враховуючи те, що  $X_L \gg R$ , визначимо напругу між сусідніми витками котушки

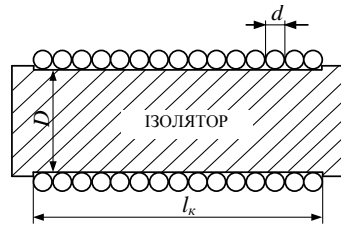


Рис.7.17. Переріз котушки індуктивності

$$\Delta u = \frac{I \cdot X_L}{w} = \frac{0,2 \cdot 1760}{400} = 0,9 \text{ В.}$$

Знаходимо мінімальну товщину лакової плівки для забезпечення заданої електричної міцності [5]

$$h_n = K \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\Delta u}{E_{np}} = 10 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{0,9}{3000} = 2 \text{ мкм.}$$

**Задача.** Визначити питомі магнітні втрати на вихрові струми в сердечнику трансформатора, зібраному з листів електротехнічної сталі марки 3405 товщиною  $h = 0,35$  мм, якщо в сердечнику діє синусоїдний магнітний потік з частотою  $f = 50$  Гц і максимальною індукцією  $B_m = 1,6$  Тл. Питомий електричний опір сталі прийняти  $\rho = 0,48$  мкОм·м.

### Розв'язування

Як відомо, вихрові струми  $i_{вихр}$  виникають у площині перпендикулярній вектору магнітної індукції  $B$ . У збірному сердечнику трансформатора тонкий лист довжиною  $l$ , висотою  $b$  і товщиною  $h$  пронизується змінним магнітним потоком уздовж площини листа (рис.7.18, 7.19).

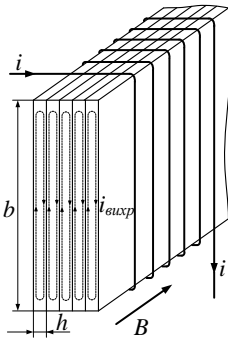


Рис.7.18. Осердя трансформатора

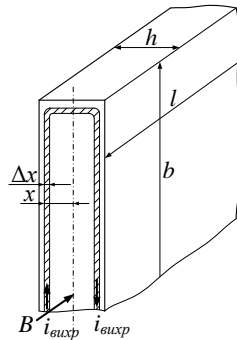


Рис.7.19. Стальний лист сердечника

Виділимо в площині листа порожній циліндр з основою, обмеженою двома контурами вихрового струму. Більші сторони цих контурів розміщені від вертикальної осі перерізу листа відповідно на  $x$  і  $\Delta x$ . Оскільки  $h \ll b$ , то можна прийняти, що довжина контуру вихрового струму дорівнює висоті листа  $b$ .

Тоді магнітний потік дорівнює

$$\Phi_x = B \cdot S = B \cdot 2xb.$$

Діюче значення індукованої ЕРС

$$E_x = \omega\Phi = 2\pi f\Phi = 6,28f \frac{B_m}{\sqrt{2}} S = 8,88fB_mxb.$$

Втрати на вихрові струми:

$$dp_\epsilon = E_x^2 \cdot dG_x,$$

де  $dG_x$  – активна провідність контуру.

Поперечний переріз контуру (заштрихована область)

$$dS_x = l_x \cdot dx,$$

де  $l_x \approx 2b$  – довжина контуру протікання вихрових струмів.

Тоді провідність

$$dG_x = \frac{l \cdot dx}{2bp}.$$

Звідси, питомі втрати дорівнюють

$$dp_\epsilon = 8,88fBxb^2 \cdot \frac{l \cdot dx}{2bp} = \frac{39,4f^2B_m^2x^2bl}{\rho} \cdot dx.$$

Загальні втрати при протіканні вихрових струмів у товщині всього листа знайдемо, проінтегрувавши останнє рівняння

$$P_\epsilon = \frac{39,4f^2B_m^2bl}{\rho} \cdot \int_0^{\frac{h}{2}} x^2 \cdot dx = \frac{39,4f^2B_m^2bl}{\rho} \cdot \frac{\left(\frac{h}{2}\right)^3}{3} = \frac{1,64f^2B_m^2blh^3}{\rho}.$$

Прийнявши, що  $V = blh$  – об'єм листа, обчислюємо питомі втрати в осерді трансформатора

$$\Delta p_\epsilon = \frac{1,64f^2B_m^2h^2}{\rho} = \frac{1,64 \cdot 50^2 \cdot 1,6^2 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3}^2}{0,48 \cdot 10^{-6}} = 2680 \frac{Bm}{m^3} \approx 2,7 \frac{mBm}{cm^3}.$$

## ДОДАТКИ

### Коефіцієнти теплопровідності деяких електротехнічних матеріалів

Табл.Д1.1.

Речовина	$\gamma_T$ , Вт/м·К	Речовина	$\gamma_T$ , Вт/м·К
Повітря	0,05	Стеатит	2,2
Бітуми	0,07	Кварц	12
Папір	0,1	Графіт	18
Лакотканина	0,13	Залізо	68
Гетинакс	0,35	Алюміній	226
Фарфор	1,6	Мідь	390

### Електрофізичні властивості електроізоляційних смол

Табл.Д2.1.

Тип смоли Параметр	Фенольно- формальдегідна	Епоксидна	Кремній- органічна
Густина, Мгр/м <sup>3</sup>	1,25÷1,3	1,1÷1,25	1,6÷1,75
Нагрівостійкість, °С	105÷120	120÷140	180÷220
Коефіцієнт теплопровідності $\gamma_T$ , Вт/(м·К)	0,13÷0,25	0,2	0,08
Питомий опір, Ом·м	10 <sup>11</sup> ÷10 <sup>12</sup>	10 <sup>12</sup> ÷10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup> ÷10 <sup>14</sup>
Діелектрична проникність	5÷6,5	3÷4	3,5÷5
$tg\delta \cdot 10^{-2}$	1÷10	1÷3	1÷3
$E_{np}$ , МВ/м	10÷20	20÷80	15÷25

### Електрофізичні властивості деяких класів кераміки

Табл.Д2.2.

Тип кераміки Параметр	А	Б	В
$\varepsilon$	14÷250	900÷9800	6÷10
$\rho$ , Ом·м	10 <sup>12</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>14</sup> ÷10 <sup>17</sup>
$E_{np}$ , МВ/м	6÷35	5÷25	20÷45
$tg\delta$	6·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup> ÷2·10 <sup>-3</sup>



## Електрофізичні характеристики природних смол

Табл.Д2.3.

Назва	Густина $D$ , гр/см <sup>3</sup>	$t_p$ , °C	$\rho_v$ , Ом·м	Розчинник	Застосування
Каніфоль	1,08	54÷68	$10^{17} \div 10^{18}$	Спирт, бензин, скипидар, ацетон	Складова лаків, компаундів і флюсів
Копал	1,06	75÷170	$10^{17} \div 10^{18}$	Спирт, ефір	Складова лаків
Шелак	1,02	50÷80	$10^{17} \div 10^{18}$	Спирт, ацетон	Клеючі лаки
Бурштин	1,07	175÷200	$< 10^{21}$	Важкорозчинний	Виготовлення ізоляторів

## Електрофізичні характеристики синтетичних смол

Табл.Д2.4.

Назва	Густина $D$ , гр/см <sup>3</sup>	$\rho_v$ , Ом·м	Розчинник	Застосування
Гліфталева	1,325	$10^{11} \div 10^{12}$	Суміш етилового спирту і бензолу	Виготовлення міканітів
Крезольно-формальдегідна	1,275	$10^9 \div 10^{10}$	Етиловий спирт	Лакування ізоляційних стрічок
Кремній-органічна	1,675	$10^{12} \div 10^{14}$	Суміш бензолу і ацетону	Виготовлення міканітів
Поліамідна	1,14	$10^{11} \div 10^{12}$	Феноли, оцтова кислота	Ізоляційні плівки
Поліефірна			Ацетон	Слюдяна ізоляція
Фенол-формальдегідна	1,275	$10^{10} \div 10^{12}$	Етиловий спирт, ацетон	Гаряче пресування
Епоксидно-діанова ЕД-22		$10^{10} \div 10^{12}$	Важкорозчинна	Заливні компаунди, клеї

## Узагальнені електрофізичні властивості діелектриків

Табл.Д2.5.

Матеріал	$\epsilon$ при 50 Гц	$\rho_v$ , Ом·м	$\rho_s$ , Ом	$tg\delta$ при 50 Гц	$E_{пр}$ , МВ/м	Нагрівостійкість, °С
Гетинакс	5÷6	$10^9 \div 10^{10}$	$10^{11}$	$(4 \div 10) \cdot 10^{-2}$	20÷25	150
Текстоліт	6÷8	$10^{10}$	$10^{10}$	$7 \cdot 10^{-2}$	6÷8	135
Склотекстоліт	6÷12	$10^{10}$	–	$6 \cdot 10^{-2}$	120	200
Ебоніт	2,8÷4,5	$10^{13} \div 10^{14}$	$10^{12} \div 10^{13}$	$(6 \div 13) \cdot 10^{-3}$	17÷25	50÷100
Кремній-органічна смола	3÷5	$10^{12} \div 10^{13}$	$10^{13} \div 10^{14}$	$(1 \div 3) \cdot 10^{-2}$	15÷20	180
Ескапон	2,7÷3,0	$10^{15}$	$10^{16}$	$5 \cdot 10^{-4}$	35	80÷100
Слюда	6,8÷7,2	$10^{11} \div 10^{13}$	$10^{11} \div 10^{12}$	$4 \cdot 8 \cdot 10^{-3}$	–	–
Ситалл	5÷7	$10^{10} \div 10^{11}$	$10^{13}$	$1 \cdot 10^{-3}$	20÷80	–
Мікалекс	6÷8,5	$10^{10} \div 10^{12}$	$10^{10} \div 10^{12}$	$(3 \div 10) \cdot 10^{-3}$	10÷20	300÷500
Полівінілхлорид (вініпласт)	3,2÷4,0	$10^{12} \div 10^{13}$	$10^{14}$	$(1 \div 5) \cdot 10^{-2}$	15÷35	65
Поліметилметакрилат (орг. скло)	3,5÷4,5	$10^{11} \div 10^{12}$	$10^{11} \div 10^{12}$	$(2 \div 8) \cdot 10^{-2}$	20÷30	70÷90
Полівінілхлорид	3÷5	$10^{13} \div 10^{14}$	$10^{13} \div 10^{14}$	$(3 \div 8) \cdot 10^{-2}$	15÷20	60÷70
Поліетилен	2,3÷2,4	$10^{14} \div 10^{15}$	$10^{14}$	$(1 \div 5) \cdot 10^{-4}$	15÷20	90÷120
Полікарбонат	3,2	$10^{14} \div 10^{15}$	$10^{14} \div 10^{15}$	$(4 \div 8) \cdot 10^{-3}$	30	150÷165
Полістирол	2,4÷2,6	$10^{14} \div 10^{15}$	$10^{15}$	$(1 \div 3) \cdot 10^{-4}$	20÷35	70÷90
Поліамідні смоли	3÷4	$10^{11} \div 10^{12}$	$10^{12}$	$(1 \div 4) \cdot 10^{-2}$	15÷20	100÷120
Фторопласт-4	1,9÷2,2	$10^{15} \div 10^{16}$	$10^{17}$	$(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$	20÷30	250÷300

## Електрофізичні властивості металів

Табл.Д3.1.

Метал	$T_{пл},$ °C	Густина $D,$ г/см <sup>3</sup>	$C,$	$\gamma_T,$	$TK_l \times 10^{-6},$	$\rho \times 10^{-6},$	$TK_p \times 10^{-4},$	Магнітні власти- вості
			Дж кг·К	Вт м·К	К <sup>-1</sup>	Ом·м	К <sup>-1</sup>	
Нікель	1455	8,9	444	95	13	0,073	65	Ф
Кобальт	1492	8,71	435	79	12	0,062	60	Ф
Залізо	1535	7,87	452	73	11	0,098	60	Ф
Паладій	1554	12,1	243	72	12	0,11	-	П
Титан	1725	4,5	577	15	8,1	0,48	33	П
Хром	1850	7,1	462	88	6,5	0,21	24	П
Платина	1770	21,4	134	71	9	0,105	39	П
Молібден	2620	10,2	264	151	5,1	0,057	46	П
Реній	3180	20,5	138	71	4,7	0,21	32	П
Вольфрам	3380	19,3	218	168	4,4	0,055	46	П
Ртуть	-39	13,6	138	10	61	0,958	9	Д
Олово	232	7,31	226	65	23	0,12	44	П
Кадмій	321	8,65	230	93	30	0,076	42	Д
Свинець	327	11,4	130	35	29	0,21	37	Д
Цинк	420	7,14	390	111	31	0,059	40	Д
Магній	651	1,74	1040	167	26	0,045	42	П
Алюміній	657	2,7	922	209	24	0,028	42	П
Срібло	961	10,5	234	415	19	0,016	40	Д
Золото	1063	19,3	126	293	14	0,024	38	Д
Мідь	1083	8,94	385	390	16	0,017	43	Д

## Олов'яно-свинцеві припої

Табл.Д3.2.

Марка припою	Склад, %*		$\rho \times 10^{-6},$ Ом·м	$TK_l \times 10^{-6},$ К <sup>-1</sup>	$T_{пл},$ °C	$\sigma,$ МПа	Застосування
	<i>Sn</i>	<i>Sb</i>					
ПОС90	90	0,15÷2,5	0,13÷0,19	25÷27	210	49	Лудіння і па- яння міді, ла- туні, срібла, заліза,
ПОС61	61	0,15÷2,5	0,13÷0,19	25÷27	191	43	
ПОС40	40	0,15÷2,5	0,13÷0,19	25÷27	238	38	
ПОС30	30	0,15÷2,5	0,13÷0,19	25÷27	266	30	
ПОС18	18	0,15÷2,5	0,13÷0,19	25÷27	277	30	
ПОС10	10	0,15÷2,5	0,13÷0,19	25÷27	299	32	

\* Інше – Pb.

## Мідно-цинкові припої

Табл.Д3.3.

Марка припою	Склад, %*		$\rho \times 10^{-6}$ , Ом·м	$TK_l \times 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>	$T_{пл}$ , °С	$\sigma$ , МПа	Застосування
	Cu	Zn					
ПМЦ-36	36	64	0,103	22	825	–	
ПМЦ-48	48	52	0,045	21	865	205	
ПМЦ-54	54	46	0,04	221	880	345	

## Склад і механічні властивості залізо-хромо-нікелевих сплавів

Табл.Д3.4.

Марка сплаву	Склад, %*				$\sigma$ , МПа		
	Cr	Al	Ni	Mn	20 °С	800 °С	1000 °С
<b>Фехралі</b>							
X13Ю4	12÷15	3,5÷5,5	0,6	0,7	700	–	–
X15Ю5	13÷15	3,5÷5,5	0,6	0,7	–	–	–
1X17Ю5	16÷19	4÷6	0,6	0,7	700	–	–
0X17Ю5	16÷19	4÷6	0,6	0,7	700	–	–
<b>Хромалі</b>							
X23Ю5	22÷25	4,5÷5,5	0,6	0,7			
0X23Ю5Т	22÷25	4,5÷5,5	0,6	0,7	660	120	17
1X25Ю5	23÷27	4,5÷5,5	0,6	0,7	660	120	17
0X25Ю5	23÷27	4,5÷6,5	0,6	0,7	660	120	17
0X27Ю5А	25÷28	4,5÷6,5	0,6	0,7	660	120	17
0X27Ю5Е	25÷28	4,5÷6,5	0,6	0,7	675	89	13

## Електрофізичні властивості залізо-хромо-нікелевих сплавів

Табл.Д3.5.

Марка сплаву	$\rho \times 10^{-6}$ , Ом·м	$TK_p \times 10^{-4}$ , К <sup>-1</sup>	Оптимальна робоча температура, °С	Максимальна робоча температура, °С	$\frac{R_{1000^\circ\text{C}}}{R_{20^\circ\text{C}}}$
<b>Фехралі</b>					
X13Ю4	1,26	15	750	–	–
X15Ю5	1,18÷1,34	15	900	1000	1,112
1X17Ю5	1,3	–	850	–	–
0X17Ю5	1,3	6	950	–	–
<b>Хромалі</b>					
X23Ю5	1,4	6,5	1100	1200	–
0X23Ю5Т	1,29÷1,45	–	1150	1200	1,033
1X25Ю5	1,4	5	1150	1200	–
0X27Ю5Т	1,37÷1,47	5	1250	1300	0,998

### Склад і механічні властивості хромо-нікелевих сплавів

Табл.ДЗ.6.

Марка сплаву	Склад, % *			σ, МПа		
	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	20 °С	800 °С	1000 °С
<b>Фероніхром</b>						
X15H60	15÷18	55÷61	1,5	660	170	60
X15H60H	15÷18	55÷61	1,5	660	170	60
<b>Ніхром</b>						
X20H80	20÷23	75÷78	1,5	670	210	73
X20H80H	20÷23	75÷78	1,5	670	210	73

### Електрофізичні властивості хромо-нікелевих сплавів

Табл.ДЗ.7.

Марка сплаву	$\rho \times 10^{-6}$ , Ом·м	$TK_{\rho} \times 10^{-4}$ , К <sup>-1</sup>	Оптимальна робоча температура, °С	Максимальна робоча температура, °С	$\frac{R_{1000^{\circ}\text{C}}}{R_{20^{\circ}\text{C}}}$
<b>Фероніхром</b>					
X13Ю4	1,1÷1,2	10÷20	950	1000	1,139
X15Ю5	1,1÷1,2	10÷20	1000	1100	1,138
<b>Ніхром</b>					
X23Ю5	1,0÷1,1	10÷20	1050	1100	1,078
0X23Ю5Т	1,0÷1,1	10÷20	1150	1200	1,076

### Склад і електрофізичні властивості радіотехнічних сплавів

Табл.ДЗ.8.

Марка сплаву	Склад, % *			$\rho \times 10^{-6}$ , Ом·м	$TK_{\rho} \times 10^{-4}$ , К <sup>-1</sup>	σ, МПа
	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>			
Манганін	85	12	3	0,6÷5	450÷600	15÷30
Константан	55	—	45	0,5÷2,5	400÷500	20÷40

## Властивості напівпровідникових хімічних сполук

Табл.Д4.1.

Хімічна сполука	Густина $D$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma_T$ , $\frac{Вт}{м \cdot К}$	$T_{пл}$ , °С	$W$ , еВ	Рухливість електронів, $\frac{м^2}{В \cdot с}$	Рухливість дірок, $\frac{м^2}{В \cdot с}$	Застосування
<b>Сульфіди</b>							
<i>PbS</i>	7,6	2,9	1114	0,37	0,06	0,07	фото-резистори
<i>Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub></i>	7,39	2,0	720	1,3	–	–	
<b>Селеніди</b>							
<i>PbSe</i>	8,15	1,7	1076	0,25	0,12	0,1	фоторезистори, термоелементи
<i>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub></i>	7,4	2,5	706	0,28	0,1	–	
<b>Телуріди</b>							
<i>PbTe</i>	8,16	1,7	917	0,3	0,18	0,09	фоторезистори, термоелементи
<i>Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub></i>	–	1,1	585	0,15	0,12	0,05	
<b>Оксиди</b>							
<i>Cu<sub>2</sub>O</i>	5,9	6,1	1230	0,34	0	0,005	випрямлячі, фотоелементи
<i>ZnO</i>	5,6	–	–	3,2	0,05	–	термо-резистори
<i>TiO<sub>2</sub></i>	4,2	–	1640	2,9	0,001	–	

## Властивості напівпровідникових хімічних сполук типу $A^{III}B^V$

Табл.Д4.2.

Хімічна сполука	Густина $D$ , г/см <sup>3</sup>	Показник заломлення	$\alpha \times 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	$W$ , еВ	Рухливість електронів, $\frac{м^2}{В \cdot с}$	Рухливість дірок, $\frac{м^2}{В \cdot с}$	Застосування
<b>Фосфіди</b>							
<i>AlP</i>	2,4	–	–	–	0,008	0,003	світлодіоди
<i>GaP</i>	4,1	3,4	4,8	2,25	0,019	0,019	
<i>InP</i>	4,8	3,3	4,5	1,29	0,5	0,5	
<b>Арсеніди</b>							
<i>AlAs</i>	3,6	–	3,5	–	0,3	0,03	фотоелементи, діоди, лазери
<i>GaAs</i>	5,4	3,2	5,4	1,43	0,95	0,045	
<i>InAs</i>	5,7	3,2	4,8	0,36	3,3	0,05	
<b>Антимоніди</b>							
<i>AlSb</i>	4,3	3,3	4,2	–	0,02	0,055	давачі Холла, фільтри
<i>GaSb</i>	5,7	3,7	6,2	0,67	0,4	0,14	
<i>InSb</i>	5,8	4,1	5,0	0,17	10	0,1	

## Властивості напівпровідникових хімічних сполук типу $A^{II}B^{VI}$

Табл.Д4.3.

Хімічна сполука	Густина $D$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma_T$ , Вт/м·К	$T_{пл}$ , °С	$W$ , еВ	Рухливість електронів, $\frac{m^2}{V \cdot c}$	Рухливість дірок, $\frac{m^2}{V \cdot c}$	Застосування
<b>Сульфіди</b>							
ZnS	4,04	–	1850	3,6	–	–	фото-резистори
CdS	4,82			2,4	0,024	0,005	
<b>Селеніди</b>							
ZnSe	–	–	1525	2,7	0,07	0,07	фоторезистори, термо-елементи
CdSe	5,81	–	1258	1,8	0,058÷0,08	0,058÷0,08	
<b>Телуріди</b>							
ZnTe	–	–	1239	2,2	–	–	фоторезистори, термо-елементи
CdTe	5,86	8,5	1098	1,6	0,076÷5,7	0,006	

## Склад і магнітні властивості різновидів заліза

Табл.Д.5.1.

Тип заліза	Домішки		Магнітні властивості			
	C	O <sub>2</sub>	$\mu_{ноч} \cdot 10^3$ при $H=0,1$ А/м	$\mu_{max} \cdot 10^3$	$H_c$ , А/м	
Технічно чисте залізо	0,02	0,06	0,25	7	64	
Електролітичне залізо	0,02	0,01	0,6	15	28	
Електролітичне залізо переплавленне у вакуумі	0,01	–	–	61	7,2	
Карбонільне залізо	0,005	0,005	3,3	21	6,4	
Залізо, відпалене у водні	0,005	0,003	6,0	200	3,2	

## Магнітні властивості деяких видів електротехнічної сталі

Табл.Д.5.2.

Марка сталі	Товщина листа, мм	Питомі магнітні втрати при $f = 50$ Гц, Вт/кг		Магнітна індукція $B$ при напруженості магнітного поля $H$			
		$\Delta P$ при $B = 1$ Тл	$\Delta P$ при $B = 1,5$ Тл	100	2500	5000	30000
2013	0,5	2,5	5,6	–	1,65	1,75	2,05
2112	0,5	2,6	6,0	–	1,6	1,68	2,02
2212	0,5	2,2	5,0	–	1,6	1,68	2,0
2312	0,5	1,75	4,0	–	1,56	1,66	1,96
2412	0,5	1,3	3,1	–	1,5	1,6	1,95
3411	0,5	1,1	2,45	–	1,75	–	–
3414	0,5	0,7	1,5	1,6	1,88	–	–
3415	0,35	0,46	1,03	1,61	1,9	–	–

## Магнітні і електричні властивості пермалоїв

Табл.Д.5.3.

Марка	$\mu_{\text{поч}} \cdot 10^3$ при $H=0,1$ А/м	$\mu_{\text{max}} \cdot 10^3$	$H_c$ , А/м	$B_{\text{max}}$	$\rho$ , мкОм·м
Нелеговані, низьконікелеві					
45Н, 50Н	1,7÷3	16÷35	32÷10	1,5	0,45
Леговані, низьконікелеві					
50НХС	1,5÷3,2	15÷30	20÷8	1,0	0,9
Леговані, високонікелеві					
79НМ, 80НХС, 76НХД	16÷35	50÷220	5,2÷1,0	0,65	0,55
Супермалой					
79%Ni-5%Mo- 15%Fe-0,5%Mn	100	1500	0,3	0,8	0,6

## Магнітні і електричні властивості феритів

Табл.Д.5.4.

Марка фериту	$\mu_{\text{поч}} \cdot 10^3$ при $H=0,1$ А/м	$\mu_{\text{max}} \cdot 10^3$	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл	$f_{\text{зр.}}$ МГц	$t_{\text{Кюри}}$ °С	$\rho$ , Ом·м	Густина, г/см <sup>3</sup>
200000 НМ	15	35	0,24	0,11	0,1	110	0,001	–
6000НМ	4,8÷8	10	8	0,11	0,5	130	0,1	5,0
1000НМ	0,8÷1,2	1,8	28	0,11	5	200	0,5	4,5
600НН	0,5÷0,8	1,5	40	0,12	5	110	100	4,8
2000НМ1	1,7÷2,5	3,5	25	0,12	1,5	110	5	5,0
700НМ1	0,55÷0,85	1,8	25	0,05	8	200	4	4,8
100ВЧ	0,08÷0,12	0,28	300	0,15	80	200	10 <sup>5</sup>	4,8
20ВЧ2	0,016÷0,024	0,045	1000	0,1	300	400	10 <sup>6</sup>	4,7
300НН	0,28÷0,35	0,6	80	0,13	20	450	10 <sup>6</sup>	4,8
9ВЧ	0,009÷0,013	0,03	1500	0,06	600	120	10 <sup>7</sup>	4,4
200ВЧ	0,18÷0,22	0,36	70	0,11	–	360	10 <sup>3</sup>	4,7
50ВЧ3	0,045÷0,065	0,2	100	0,14	–	480	10 <sup>4</sup>	4,6

## Склад і властивості мартенситних сталей для постійних магнітів

Табл.Д.5.5.

Марка сталі	Склад, %					$H_c$ , кА/м	$B_r$ , Тл
	C	Cr	W	Co	Mo		
EX	0,95÷1,1	1,3÷1,6	–	–	–	4,6	0,9
EX3	0,9÷1,1	2,8÷3,6	–	–	–	4,8	0,95
E7B6	0,68÷0,78	0,3÷0,5	5,2÷6,2	–	–	5,0	1,0
EX5K5	0,9÷1,05	5,5÷6,5	–	–	–	8,0	0,85
EX9K15M	0,9÷1,05	8÷10	–	–	1,2÷1,7	13,6	0,8



## Характеристики проводів і кабелів

Табл.Д6.1.

Марка про- воду	Діаметр проводу без ізоляції, мм	Характеристика проводу
<b>МІДНІ обмотувальні проводи з волокнистої ізоляції</b>		
ПБ	1÷5,2	Провід ізольований декількома шарами ка- бельного паперу
ПБО	Прямокутні $a = 2,44 \div 5,5$ $b = 6,9 \div 22$	Те ж, але з підвищеною електричною міцністю
ПБД	0,18÷5,2	Провід, ізольований двома шарами обмотки з бавовняної пряжі
ПСД	0,31÷5,2	Провід, ізольований двома шарами обмотки з скловолокна, просоченого нагрівостійким гліфталевим лаком
ПСДК	0,31÷5,2	Те ж, але просочення нагрівостійким кремнійорганічним лаком
<b>АЛЮМІНІЄВІ обмотувальні проводи з волокнистої ізоляції</b>		
АПБ	1,35÷8	Провід круглого або прямокутного перерізу, ізольований кількома шарами обмотки зі стрічок кабельного паперу
АПБД	Прямокутного перерізу: $a = 2,1 \div 5,5$ $b = 4,1 \div 14,5$	Те ж, але ізольований двома шарами обмотки з бавовняної пряжі
АПСД	1,62÷5,2	Провід круглого або прямокутного перерізу, ізольований двома шарами обмотки із скло- волокна, просоченого нагрівостійким гліфталевим лаком
АПЛБД	Круглий переріз: діаметр 1,35÷8	Провід круглого або прямокутного перерізу, ізольований обмоткою з лавсанового волок- на і одним шаром бавовняної обмотки
<b>МІДНІ обмотувальні проводи з емалевою волокнистою ізоляцією</b>		
ПЕЛБО	0,38÷2,1	Провід, ізольований масляною емаллю і одним шаром обмотки з бавовняної пряжі
ПЕЛБД	0,72÷2,1	Провід, ізольований масляною емаллю і двома шарами обмотки з бавовняної пряжі
ПЕЛШО	0,05÷2,1	Те саме, але на шар емалі накладено шар обмотки з натурального шовку
ПЕТКСОТ	0,33÷1,56	Те ж, але на основі нагрівостійкої кремнійорганічної емалі

## Основний асортимент установочних проводів з пластмасовою ізоляцією

Табл.Д.6.2.

Марка проводу	Число жил і переріз, мм <sup>2</sup>	Характеристика проводу	Область застосування
ПВ	1 0,5÷0,95	Провід з мідною жилою, ізольованою поліхлорвініловим пластиком	Освітлювальні і силові мережі в приміщеннях при температурі не вище 40 °С, у сирих і особливо сирих приміщеннях на напруги 380 та 660 В змінного струму
АПВ	1 2,5÷120	Те ж, але з алюмінієвими жилами	
АПП	1 2,5÷120	Те ж, але жила має поліетиленову ізоляцію	
ППВ	2÷3 0,75÷4	Провід стрічковий (плоский) з мідними жилами, ізольованими і укладеними паралельно і ззовні в поліхлорвініловій ізоляції	Те ж, але тільки для освітлювальних мереж
АППВ	2÷3 2,5÷6	Те ж, але з алюмінієвими жилами	
ПГВ	1 0,5÷0,95	Провід гнучкий багатожильний з поліхлорвініловою ізоляцією	Освітлювальні і силові мережі всередині приміщень на напруги 380 і 660 В
ПП	1 0,5÷0,95	Те ж, але гнучка жила має поліетиленову ізоляцію	
ПГВ	1 0,5÷0,95	Провід гнучкий багатожильний з поліхлорвініловою ізоляцією	

## Основний асортимент установочних проводів і шнурів з гумовою ізоляцією

Табл.Д.6.3.

Марка проводу	Число жил і переріз, мм <sup>2</sup>	Характеристика проводу	Область застосування
ПР	1 0,75÷240	Провід мідний з гумовою ізоляцією в оплітці з бавовняної пряжі, просоченої протигрибковим складом	Освітлювальні і силові мережі в приміщеннях і поза ними, при змінній напрузі до 660 В (ПР-1000) і до 3000 В (ПР-3000)
АПР	1 2,5÷240	Те ж, але жила з алюмінію	Те ж, але в установках з напругою 660 В змінного струму (АПР-1000)
ПРГ	1 0,75÷240	Провід мідний гнучкий з гумовою ізоляцією в оплітці з бавовняної пряжі, просоченої протигрибковим складом	З'єднання обмоток всередині електричних машин і апаратів в установках з номінальною напругою до 660 В змінного струму (ПР-1000), до 3000В змінного струму (ПР-3000)
ПРД	2 0,75÷6	Провід мідний гнучкий з гумовою ізоляцією в непросоченій оплітці з бавовняної пряжі (шнур)	Освітлювальні мережі в сухих і опалювальних приміщеннях, в установках з напругою до 220 В
ПРДШ	2 0,75÷6		
ПРП	1 1÷95	Провід мідний з гумовою ізоляцією в оплітці із сталевих оцинкованих дротів	Силові та освітлювальні мережі та кола, де можливі легкі механічні впливи на провід
ПРТО	Від 1 до 4 1ч120	Провід, який складається з мідних жил з гумовою ізоляцією, що знаходиться в загальної оплітці з бавовняної пряжі, просоченої протиогнильним складом	Силові та освітлювальні мережі (Прокладання в сталевих трубах і металевих рукавах) при напрузі до 660 В змінного струму (ПРТО-1000)
АПРТО	Від 1 до 4 2,5 ч120	Те ж, але з алюмінієвими жилами	
РКГМ	1 (жила з тонких дротів) 0,75÷120	Провід мідний гнучкий, жила ізольована нагріво-стійкою кремнійорганічною гумою, поверх якої є обплетення із скловолокна, просочене кремній-органічним лаком	Виводи електродвигунів і апаратів з напругою до 660 В з підвищеними робочими температурами до 180 °С

## Основний асортимент мідних монтажних проводів

Табл.Д6.4.

Марка проводу	Переріз мідної жили, мм <sup>2</sup>	Характеристика проводу	Область застосування
МРП	0,35÷1,5	Провід з однієї мідної жили з гумовою ізоляцією в облєтєнні з бавовняної пражі, просочєної парафіном	Для фіксованого монтажу в пристроях 380 В змінного струму і 500 В постійного струму при температурі від -40 до +65 °С
МРПЄ	0,35÷1,5	Те ж, але поверх бавовняного облєтєння є екран з мідних луджєних проводів	Те ж, але захищений екраном з луджєних проводів
МГВ	0,1÷1	Провід багатожильний гнучкий з ізоляцією з полїхлорвінілового пластику	Те ж, а також для підведення до акумуляторних батарей
МГВЛ	0,35÷5	Те ж, але з лакованою бавовняною оплїткою	
МГВЛЄ	0,35÷5	Те ж, але екранований	Те ж, але захищенє екраном з луджєних мідних проводів
ПМВ	0,1÷0,75	Провід з однієї мідної жили з ізоляцією з полїхлорвінілового пластику	Для монтажу при підвищеній вологості в пристроях 380 В змінного струму і 500 В постійного струму при температурі від -50 до +70 °С
ПМВГ	0,1÷0,75	Провід багатожильний гнучкий з бавовняною ізоляцією з полїхлорвінілового пластику	Для монтажу при підвищеній вологості в пристроях 380 В змінного струму і 500 В постійного струму при температурі від -50 до +70 °С
МГТФ	0,2÷1,5	Провід багатожильний гнучкий з фторопластовою нагрівостійкою ізоляцією	Для монтажу в приладах і апаратах при напрузі до 250 В і температурах від -60 до +90 °С
МГШ	0,05÷0,1	Провід багатожильний в облєтєнні з капронової пражі	Для монтажу всередині приладів при напрузі до 24 В і температурах від -60 до +90 °С

## Перелік умовних скорочень

- $\alpha$  – температурний коефіцієнт,  $K^{-1}$ ;  
 $\gamma$  – питома електропровідність,  $См/м$ ;  
 $\gamma_S$  – питома поверхнева провідність ділянки ізоляції,  $См$ ;  
 $\gamma_V$  – питома об’ємна провідність ділянки ізоляції,  $См/м$ ;  
 $\gamma_T$  – коефіцієнт теплопровідності,  $Вт/м \cdot K$ ;  
 $\Delta$  – глибина проникнення поля в провідник,  $м$ ;  
 $\Delta\phi_H$  – різниця потенціалів Холла,  $В$ ;  
 $\delta$  – кут діелектричних втрат; *ел. градус*;  
 $\varepsilon$  – діелектрична проникність, *в.о.*;  
 $\varepsilon_0$  – електрична постійна,  $\Phi/м$ ;  
 $\eta$  – динамічна в’язкість,  $Па \cdot с$ ;  
 $\theta$  – характеристична температура,  $^{\circ}C$ , ( $K$ );  
 $\lambda$  – довжина вільного пробігу частинки, довжина електромагнітної хвилі,  $м$ ;  
 $\mu$  – дипольний момент молекули,  $Кл \cdot м$ ; магнітна проникність, *в.о.*,  
рухливість носіїв заряду,  $м^2/В \cdot с$ ;  
 $\mu_0$  — магнітна постійна,  $Гн/м$ ;  
 $\rho$  – питомий (об’ємний) опір,  $Ом \cdot м$ ;  
 $\rho_S$  – питомий поверхневий опір,  $Ом$ ;  
 $\rho_T$  – питомий тепловий опір,  $м \cdot K/Вт$ ;  
 $\sigma$  – поверхнева густина заряду,  $Кл/м^2$ ; механічна міцність,  $МПа$ ;  
коефіцієнт теплопередачі,  $Вт/м^2 \cdot K$ ;  
 $\tau$  – постійна часу (час), *сек*;  
 $\varphi$  – відносна вологість повітря, %; кут зсуву фаз, *ел. градус*;  
 $\psi$  – вологість матеріалу, %; коефіцієнт термоЕРС,  $В/К$ ;  
 $\omega$  – кутова частота;  $с^{-1}$ ;  
 $B$  – магнітна індукція,  $Тл$ ;  
 $C$  – ємність конденсатора,  $\Phi$ ; теплоємність,  $Дж/кг$ ;  
 $c$  – швидкість світла,  $м/с$ ; питома теплоємність,  $Дж/кг \cdot K$ ;  
 $D$  – густина,  $кг/м^3$  ( $г/см^3$ ); електрична індукція,  $Кл/м^2$ ;  
 $d$  – діаметр,  $м$ ;  
 $E$  – напруженість електричного поля,  $В/м$ ; ЕРС,  $В$ ;  
 $E_{np}$  – електрична міцність,  $В/м$ ;  
 $e$  – заряд електрона,  $Кл$ ; миттєве значення ЕРС,  $В$ ; основа натуральних логарифмів;  
 $f$  – частота,  $Гц$ ;  
 $G$  – електропровідність,  $См$ ;  
 $H$  – напруженість магнітного поля,  $A/м$ ;  
 $H_C$  – коерцитивна сила,  $A/м$ ;

$h$  – постійна Планка,  $eB \cdot c$ ; висота (товщина),  $m$ ;  
 $I$  – сила струму,  $A$ ;  
 $i$  – миттєве значення сили струму,  $A$ ;  
 $J$  – густина струму,  $A/mm^2$ ; намагніченість речовини,  $A/m$ ;  
 $K$  – питома ємність,  $\Phi/m$ ;  
 $k$  – постійна Больцмана,  $Dж/K$ ;  
 $L$  – індуктивність,  $Gн$ ;  
 $L_0$  – число Лоренца,  $B^2 \cdot K^{-2}$ ;  
 $l$  – довжина, довжина вільного пробігу носіїв заряду,  $m$ ;  
 $M$  – молекулярна маса,  $a.o.m.$ ;  
 $m$  – маса;  $кг$ ;  
 $N_A$  – число Авогадро,  $моль^{-1}$ ;  
 $n$  – показник заломлення;  $в.о.$ ;  
 $n$  – число частинок в одиниці об'єму,  $m^{-3}$ ; концентрація носіїв,  $m^{-3}$ ;  
 $P$  – потужність,  $Вт$ ; поляризованість,  $Кл/м^2$ ; повні діелектричні втрати в ізоляції,  $Вт$ ; втрати на гістерезис та перемагнічування,  $Вт$ ;  
 $p$  – тиск,  $Па$ ; питомі втрати потужності,  $Вт/м^3$ ;  
 $p_0$  – концентрація дірок,  $m^{-3}$ ;  
 $Q$  – заряд конденсатора,  $Кл$ ; добротність контуру,  $в.о.$ ;  
 $q$  – заряд,  $Кл$ ;  
 $R$  – опір,  $Ом$ ;  
 $R_V$  – об'ємний опір ізоляції,  $Ом$ ;  
 $R_S$  – поверхневий опір ізоляції,  $Ом$ ;  
 $R_{\square}$  – опір квадрата поверхні,  $Ом$ ;  
 $r$  – радіус,  $m$ ;  
 $S$  – площа поперечного перерізу (поверхні),  $m^2$ ;  
 $T$  – абсолютна температура,  $^{\circ}K$ ;  
 $TK_{\epsilon}(\alpha_{\epsilon})$  – температурний коефіцієнт діелектричної проникності,  $K^{-1}$ ;  
 $TK_{\rho}(\alpha_{\rho})$  – температурний коефіцієнт питомого опору,  $K^{-1}$ ;  
 $TK_l(\alpha_l)$  – температурний коефіцієнт лінійного видовження,  $K^{-1}$ ;  
 $t$  – температура,  $^{\circ}C$ ;  
 $tg\delta$  – тангенс кута діелектричних втрат,  $в.о.$ ;  
 $U$  – напруга, різниця потенціалів,  $B$ ;  
 $V$  – об'єм,  $m^3$ ;  
 $v$  – швидкість,  $m/c$ ;  
 $W$  – енергія поля,  $Dж$ ; ширина забороненої зони,  $eB$ ;  
 $X$  – реактивний опір змінного струму,  $Ом$ ;  
 $x$  – константа, що характеризує розподіл компонентів у суміші,  $в.о.$ ;  
 $y$  – об'ємні концентрації компонентів у суміші,  $в.о.$ ;  
 $Z$  – повний опір змінного струму,  $Ом$ .

## Використана література

1. Агеева Н. Д. Электротехническое материаловедение : учеб. пособие / Н. Д. Агеева, Н. Г. Винаковская, В. Н. Лифанов. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2006. – 76 с.
2. Бовсуновський А. П. Електротехнічні матеріали : короткий довідник / А. П. Бовсуновський. – К. : НУХТ, 2012. – 36 с.
3. Богородицкий Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, В. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
4. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посібник / І. І. Василенко, В. В. Широков, Ю. І. Василенко. – Львів : Магнолія-2006, 2009. – 242 с.
5. Викулин И. М. Физика электрорадиоматериалов: учеб. пос. для студентов вузов / И. М. Викулин, Б. В. Коробицын, С. К. Крыськив. – Одесса, 2010. – 313 с.
6. Городжа А. Д. Матеріалознавство та електротехнічні матеріали: навчальний посібник / А. Д. Городжа. – К. : КНУБА, 2002. – 280 с.
7. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство: підручн. / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар. – К. : Грамота, 2006. – 312 с.
8. Калинин Н. Н., Скибинский Г. Л., Новиков П. П. Электро-радиоматериалы / Н. Н. Калинин, Г. Л. Скибинский, П. П. Новиков. – М. : «Высшая школа», 1981 г. – 293 с.
9. Колесов С. Н. Электроматериаловедение (Электротехнические материалы) : учебник для студ. электротехн. и электромех. спец. вузов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Днепропетровск : – Лира ЛТД, 2007. – 476 с.
10. Леонтьев В. О. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник / В. О. Леонтьев, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 122 с.
11. Серебряков А. С. Электротехническое материаловедение. Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы : учеб. пособие для вузов ж-д. транспорта / А. С. Серебряков. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 372 с.

12. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, В. М. Тареева. – М. : Энергия. Т. 1. – 1986. – 368 с.; Т. 2. – 1987. – 464 с.; Т. 3. – 1988. – 768 с.
13. Сулима В. С. Електрорадіоматеріали : навчальний посібник / В. С. Сулима. Укр. інж.-пед. акад. – Х. : УПА, 2010. – 128 с.
14. Трушкин А. Н. Химия и электрорадиоматериалы : учеб. пособие / А. Н. Трушкин. – Севастополь : СевНТУ, 2013. – 201 с.
15. Швець Є. Я. Матеріали і компоненти електроніки : навчальний посібник / Є. Я. Швець., І. Ф. Червоний, Ю. В. Головка. – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 278 с.



## Зміст

	ст.
<b>ПЕРЕДМОВА.....</b>	<b>3</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРО- ІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ.....</b>	<b>5</b>
1.1. Будова речовини.....	5
1.2. Класифікація електрорадіоматеріалів.....	17
1.3. Фізична суть провідності діелектриків.....	21
1.4. Поляризація діелектриків.....	28
1.5. Діелектрична проникність.....	32
1.6. Розрахунок поля в багат шарових діелектриках....	39
1.7. Діелектричні втрати.....	42
1.7.1. Діелектричні втрати в газах.....	47
1.7.2. Діелектричні втрати в рідинах.....	47
1.7.3. Діелектричні втрати в твердих діелектриках	49
1.7.4. Вплив деяких факторів на діелектричні втрати	51
1.8. Пробій діелектриків.....	52
1.8.1. Пробій газів.....	54
1.8.2. Пробій рідких діелектриків.....	56
1.8.3. Пробій твердих діелектриків.....	57
1.8.4. Фактори, що впливають на пробій діелектриків.....	60
1.9. Фізико-хімічні та механічні властивості діелектриків.....	62
1.9.1. Теплові властивості ізоляційних матеріалів..	62
1.9.2. Вологісні властивості діелектриків.....	66
1.9.3. Механічні властивості діелектриків.....	69
1.9.4. Хімічні властивості діелектриків.....	70
1.9.5. Оптичні властивості діелектриків.....	71
1.10. Контроль за якістю ізоляції.....	76
1.10.1. Електричне старіння ізоляції.....	76
1.10.2. Вплив температури на якість ізоляції електротехнічних пристроїв.....	77
1.10.3. Визначення температурного режиму обмоток.....	81
1.10.4. Дефекти і пошкодження ізоляції обмоток...	81
<i>Контрольні запитання</i> .....	85

<b>РОЗДІЛ 2. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ.....</b>	<b>86</b>	ст.
2.1. Рідкі діелектрики.....	86	
2.2. Газоподібні діелектрики.....	95	
2.3. Тверді діелектрики.....	98	
2.3.1. Електроізоляційні полімери.....	98	
2.3.2. Експлуатаційні властивості основних полімерів	101	
2.3.3. Поліконденсаційні синтетичні полімери (смоли).....	104	
2.3.4. Електроізоляційні лаки і компаунди.....	107	
2.3.5. Волокнисті та текстильні діелектрики.....	109	
2.3.6. Пластмаси. Шарові пластики.....	113	
2.3.7. Еластomers. Гума.....	115	
2.4. Тверді неорганічні діелектрики.....	117	
2.4.1. Неорганічне скло як ізоляційний матеріал....	117	
2.4.2. Керамічні діелектричні матеріали.....	120	
2.4.3. Мінеральні діелектрики.....	124	
2.5. Активні діелектрики.....	128	
2.5.1. Сегнетоелектрики.....	128	
2.5.2. П'єзоелектрики і піроелектрики.....	132	
2.5.3. Електрети.....	135	
2.6. Рідкі кристали.....	136	
2.7. Матеріали для лазерів.....	137	
<i>Контрольні запитання</i> .....	138	
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ.....</b>	<b>139</b>	
3.1. Електропровідність та теплопровідність металів.	139	
3.2. Матеріали високої провідності.....	152	
3.3. Сплави міді та сплави алюмінію.....	157	
3.4. Залізо та його сплави.....	159	
3.5. Сплави високого опору.....	161	
3.6. Контактні матеріали.....	165	
3.7. Надпровідники та кріопровідники.....	169	
3.8. Тугоплавкі матеріали.....	172	
3.9. Плівкові резистивні матеріали.....	175	
3.10. Контактоли, припої.....	178	
<i>Контрольні запитання</i> .....	181	

	ст.
<b>РОЗДІЛ 4. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ...</b>	<b>182</b>
4.1. Загальні відомості та класифікація напівпровідників.....	182
4.2. Власна провідність напівпровідників.....	184
4.3. Домішкова провідність напівпровідників.....	187
4.4. Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідників.....	190
4.5. Прості напівпровідники.....	194
4.6. Бінарні з'єднання.....	198
4.6.1. Напівпровідникові з'єднання типу $A^{IV}B^{IV}$ .....	198
4.6.2. Напівпровідникові з'єднання типу $A^{III}B^V$ .....	199
4.6.3. Напівпровідникові з'єднання типу $A^{II}B^{VI}$ .....	200
4.7. Електронно-дірковий перехід ( $p$ - $n$ перехід).....	202
<i>Контрольні запитання</i> .....	205
<b>РОЗДІЛ 5. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ.....</b>	<b>206</b>
5.1. Основні характеристики магнітних матеріалів.....	206
5.2. Фізичні процеси при намагнічуванні феромагнетиків.....	209
5.3. Магнітні втрати.....	214
5.4. Класифікація магнітних матеріалів.....	216
5.4.1. Магнітом'які матеріали.....	217
5.4.2. Магнітотверді матеріали.....	221
<i>Контрольні запитання</i> .....	226
<b>РОЗДІЛ 6. РАДІОКОМПОНЕНТИ.....</b>	<b>227</b>
6.1. Проводи та кабелі.....	227
6.2. Резистори.....	231
6.2.1. Загальні відомості про резистори та їх класифікація.....	231
6.2.2. Параметри резисторів постійного та змінного опору.....	232
6.2.3. Різновиди постійних резисторів.....	235
6.2.4. Різновиди змінних резисторів.....	237
6.2.5. Маркування та позначення резисторів.....	238
6.2.6. Терморезистори.....	240
6.2.7. Варистори.....	241
6.3. Конденсатори.....	243

	ст.
6.3.1. Загальні відомості та класифікація конденсаторів.....	243
6.3.2. Параметри конденсаторів.....	244
6.3.3. Різновиди конденсаторів.....	247
6.3.4. Позначення конденсаторів у радіоелектронних пристроях.....	250
6.4. Індуктивні компоненти.....	252
6.4.1. Котушки індуктивності.....	253
6.4.2. Параметри котушок індуктивності.....	257
6.4.3. Дроселі.....	258
6.4.4. Трансформатори.....	260
6.4.4.1. Призначення, область застосування, принцип дії.....	260
6.4.4.2. Номінальні дані трансформаторів..	263
6.4.4.3. Конструкції магнітопроводів та обмоток трансформаторів.....	264
<i>Контрольні запитання.....</i>	<i>267</i>
<b>7. ПРАКТИКУМ.....</b>	<b>268</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>304</b>
<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>317</b>
<b>ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>319</b>

**Лишук Віктор Васильович**

## **ЕЛЕКТРОРАДІОМАТЕРІАЛИ**

Навчальний посібник

Редактор: М. Богуш  
Комп'ютерний набір та верстка: В. Лишук  
Палітурка: В. Чернецький

Підписано до друку 24.05.16 р. Формат 60×80/16.  
Гарн. Таймс. Папір офсетний. Друк офсетний.  
Ум. друк. арк. 20,25. Обл. вид. арк. 20.  
Зам. 61. Тираж 300 прим.

Луцьк: Інформаційно-видавничий відділ Луцького НТУ, 2016  
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75.  
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК №4123 від 28.07.2011 р.

