

А.С. Головченко, Д.В. Ципленков,  
А.А. Колб, А.В. Ніколенко



# **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"



# ***ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ***

Дніпро  
НТУ "ДП"  
2021

УДК 620.1:620.3(075.8)

Е 50

*Рекомендовано вченою радою Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" як навчальний посібник для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (протокол № 15 від 10.11.2021).*

Рецензенти:

*Андрій Муха*, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

*Олександр Остапчук*, д-р. техн. наук, доцент, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського".

*Всеволод Кириленко*, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського".

**Електротехнічні матеріали:** навч. посіб. / А.С. Головченко, Е 50 Д.В. Циценков, А.А. Колб, А.В. Ніколенко; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ "ДП", 2021. – 184 с.

ISBN 978-966-350-763-7

*Розглянуто закономірності процесів і явищ, які відбуваються в діелектричних, провідникових, напівпровідникових і магнітних матеріалах, з яких виготовлені електротехнічні та електронні пристрої, під впливом енергії електричного, магнітного і теплового полів.*

*Основною особливістю посібника є детальна структуризація навчального матеріалу, що зорієнтовано значною мірою на дистанційну форму навчання з демонстрацією конкретних прикладів тісного взаємозв'язку властивостей різноманітних електротехнічних матеріалів з основами електротехніки.*

*Розрахован на студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», а також студентів інших спеціальностей закладів вищої освіти.*

УДК 620.1:620.3(075.8)

© А.С. Головченко, Д.В. Циценков, А.А., Колб, А.В. Ніколенко, 2021.

© НТУ "Дніпровська політехніка", 2021

ISBN 978-966-350-763-7

## З М І С Т

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1. Основні явища в електротехніці та їх закономірності</b> .....	9
1.1 Електричне поле .....	9
1.1.1 Модель атома .....	9
1.1.2 Електричні заряди .....	10
1.1.3 Силовий характер електричного поля .....	11
1.1.4 Однорідне електричне поле .....	12
1.1.5 Енергія електричного поля .....	13
1.2 Електричний струм .....	15
1.2.1 Упорядкований рух електричних зарядів .....	15
1.2.2 Закон Ома .....	16
1.2.3 Теплова енергія електричного струму .....	17
1.2.4 Діюче значення електричного струму .....	17
1.2.5 Поняття реактивного опору .....	17
1.3 Магнітне поле .....	18
1.3.1 Магнітна індукція .....	19
1.3.2 Сила Лоренца .....	19
1.3.3 Сила Ампера .....	20
1.3.4 Магнітний потік .....	20
1.3.5 Електромагнітна індукція .....	24
1.3.6 Енергія магнітного поля .....	25
1.4 Приклади розрахунку .....	27
1.4.1 Розрахунок сил електричного поля .....	27
1.4.2 Розрахунок сил магнітного поля .....	29
1.5 Контрольні запитання з основ електротехніки .....	30
<b>2. Діелектричні матеріали</b> .....	32
2.1 Поляризація діелектриків .....	32
2.1.1 Основні види поляризації .....	33
2.1.2 Основні характеристики процесу поляризації .....	35
2.1.3 Передача у просторі силового впливу електричного поля .....	42
2.1.4 Поняття електромагнітного поля .....	44
2.2 Електропровідність діелектриків .....	46

2.2.1 Електропровідність газоподібних діелектриків . . . . .	46
2.2.2 Електропровідність рідких діелектриків . . . . .	48
2.2.3 Електропровідність твердих діелектриків . . . . .	49
2.2.4 Вимірювання електричного опору твердих діелектриків . . . . .	49
2.3 Електричний пробій діелектриків . . . . .	51
2.3.1 Електричний пробій газоподібних діелектриків . . . . .	52
2.3.2 Електричний пробій рідких діелектриків . . . . .	53
2.3.3 Електричний пробій твердих діелектриків . . . . .	55
2.4 Теплові властивості діелектриків . . . . .	56
2.4.1 Теплостійкість діелектриків . . . . .	56
2.4.2 Нагрівостійкість діелектриків . . . . .	57
2.4.3 Теплопровідність діелектриків . . . . .	58
2.5 Деякі діелектричні матеріали . . . . .	59
2.5.1 Газоподібні діелектричні матеріали . . . . .	59
2.5.2 Рідкі діелектричні матеріали . . . . .	62
2.5.3 Тверді діелектричні матеріали . . . . .	65
2.6 Активні діелектрики . . . . .	73
2.6.1 Сегнетоелектрики . . . . .	73
2.6.2 Механічна напруженість . . . . .	76
2.6.3 Піроелектрики. . . . .	78
2.6.4 Електрооптичні матеріали . . . . .	79
2.6.5 Електрети . . . . .	81
2.7 Приклади розрахунку завдань з визначення параметрів діелектричних матеріалів. . . . .	82
2.7.1 Визначення параметрів поляризації діелектриків . . . . .	82
2.7.2 Визначення параметрів електропровідності діелектриків. . . . .	84
2.7.3 Визначення параметрів електричного пробою діелектриків . . . . .	85
2.7.4 Визначення параметрів активних діелектриків . . . . .	86
2.8 Контрольні запитання . . . . .	87

<b>3. Провідникові матеріали</b> . . . . .	90
3.1 Фізичні процеси і явища в провідникових матеріалах . . . . .	90
3.1.1 Активний опір провідникових матеріалів. . . . .	91
3.1.2 Реактивний опір провідникових матеріалів. . . . .	95
3.1.3 Еквівалентні схеми електричних провідників . . . . .	97
3.1.4 Емісійні і контактні явища в металах . . . . .	98
3.1.5 Блукаючі струми . . . . .	104
3.2 Метали високої електропровідності . . . . .	106
3.2.1 Мідь та її сплави . . . . .	106
3.2.2 Алюміній та його сплави . . . . .	108
3.3 Надпровідники . . . . .	109
3.3.1 Надпровідність . . . . .	109
3.3.2 Ефект Мейснера . . . . .	110
3.3.3 Природа надпровідності . . . . .	111
3.3.4 Надпровідники першого роду . . . . .	112
3.3.5 Надпровідники другого роду . . . . .	113
3.4 Метали високого електричного опору . . . . .	114
3.4.1 Резистивні сплави . . . . .	114
3.4.2 Сплави для електронагрівальних елементів . . . . .	115
3.5 Метали різного призначення . . . . .	116
3.5.1 Тугоплавкі метали . . . . .	116
3.5.2 Легкоплавкі метали . . . . .	118
3.5.3 Благородні метали . . . . .	119
3.6 Неметалеві провідникові матеріали та вироби . . . . .	121
3.6.1 Вугільні електроди . . . . .	121
3.6.2 Електричні щітки . . . . .	122
3.6.3 Вугільні порошки для мікрофонів і резисторів . . . . .	122
3.7 Напівпровідники . . . . .	123
3.7.1 Фізичні процеси, що спостерігаються в напівпровідниках, та їх застосування . . . . .	124
3.7.2 Технології створення напівпровідникових матеріалів . . . . .	131
3.7.3 Основні властивості p-n – переходів . . . . .	134
3.7.4 Використання властивостей p-n – переходів . . . . .	137

3.8 Приклади завдань з визначення параметрів провідникових матеріалів . . . . .	142
3.8.1 Розрахунок електропровідності провідників . . . . .	142
3.8.2 Розрахунок параметрів термоелектричного генератора . . . . .	143
3.8.3 Розрахунок параметрів електронагрівального елемента . . . . .	144
3.8.4 Розрахунок параметрів можливостей надпровідника . . . . .	144
3.9 Контрольні запитання . . . . .	145
<b>4. Магнітні матеріали . . . . .</b>	<b>149</b>
4.1 Фізичні процеси і явища в магнітних матеріалах . . . . .	149
4.1.1 Загальні властивості магнітних матеріалів . . . . .	149
4.1.2 Класифікація матеріалів за їх здатністю намагнічуватись . . . . .	150
4.1.3 Намагнічування магнітних матеріалів . . . . .	152
4.1.4 Перемагнічування магнітних матеріалів . . . . .	155
4.2 Вимірювання основних параметрів магнітних матеріалів . . .	160
4.2.1 Визначення магнітної проникності за показаннями приладів . . . . .	161
4.2.2 Визначення магнітних втрат за площею петлі гістерезису . . . . .	162
4.2.3 Визначення магнітних втрат за показаннями приладів . . . . .	163
4.2.4 Вимірювання комплексного магнітного опору . . . . .	164
4.3 Деякі магнітні матеріали . . . . .	168
4.3.1 Низькочастотні магнітно-м'які матеріали . . . . .	168
4.3.2 Високочастотні магнітно-м'які матеріали . . . . .	171
4.3.3 Магнітно–тверді матеріали . . . . .	173
4.4 Приклади завдань з визначення параметрів магнітних матеріалів . . . . .	175
4.4.1 Розрахунок сили дії магнітного поля на провідник зі струмом . . . . .	175
4.4.2 Розрахунок параметрів феромагнетика . . . . .	177
4.5 Контрольні запитання . . . . .	179
<b>БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК . . . . .</b>	<b>183</b>

## ВСТУП

Дисципліна “Електротехнічні матеріали” є обов’язковою (нормативною) в навчальних планах за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, що потребує значної уваги під час її викладання. Вже сама назва цієї спеціальності свідчить про актуальність глибокого розуміння процесів що спостерігаються в електротехнічних матеріалах. Важливою умовою якісного навчання студенту за цими дисциплінами є їх попередня і достатньо базова підготовка з фізики, хімії, основ електротехніки та вищої математики. Мається на увазі знання найбільш важливих фізичних явищ, що відбуваються в важливих складових частинах електротехнічного або електронного устаткування, закономірностей цих явищ та математичних формулювань цих закономірностей.

Багаторічний досвід викладення заданої навчальної та інших споріднених фундаментальних дисциплін (теоретичні основи електротехніки, теорія електричних і магнітних кіл, електричні машини, основи електроніки і мікропроцесорної техніки) для студентів Національного технічного університету “Дніпровська політехніка” дозволяє узагальнити складності, які виникають при засвоєнні цих дисциплін. Ці складності виникають унаслідок суперечностей між вимогами щодо базової підготовки та фактичного рівня підготовки студентів. У більшості випадків студенти ще не закінчили вивчати фізику та електротехніку, в неповній мірі усвідомлюють першочерговість закономірностей та явищ природи. Зокрема, більшість студентів вже знають, що електричний струм – це впорядкований рух заряджених частинок, але недостатньо глибоко розуміють сутність термінів “упорядкованість”, “рух” і “заряджені частинки”, обмежуючись математичним формулюванням закону Ома стосовно окремої частини електричного кола.

Електротехнічні матеріали можна досконально вивчити за умови повного розуміння різноманітних факторів впливу на них енергетичних полів (електричного, магнітного і теплового). Але більшість студентів на цьому навчальному етапі навіть ще не починали вивчати ці поля. Більшість опублікованих підручників та навчальних посібників, які присвячені вивченню електротехнічних матеріалів, базуються саме



на тому, що студенти вже в достатній мірі підготовлені з цих питань, і тому не звертають достатньої уваги на особливість впливу енергетичних полів на електротехнічні матеріали. Тому існує загальна потреба написати такого навчального посібника, який би допоміг заповнити прогалину між електротехнічними напрямками підготовки студентів стосовно найбільш важливих властивостей електротехнічних матеріалів та доволі обмеженою з фундаментальних дисциплін.

У даному навчальному посібнику приділена максимально можлива увага надана закономірностям процесів та явищ, які відбуваються в електротехнічних матеріалах у складі електротехнічних та електронних пристроїв – у діелектричних, провідникових, магнітних та напівпровідникових. Перш за все звертається увага на силовий характер впливу електричного та магнітного полів на заряджені частинки – сили Кулона, Ампера, Фарадея, Лоренца. Саме ці сили й є по суті основними факторами впливу на електротехнічні матеріали у складі діючого електротехнічного пристрою. Зокрема, діелектричному матеріалу властиве зміщення зв'язаних зарядів у електричному полі під впливом сил Кулона, що обумовлює поляризацію діелектрика та його нагрівання. Провідниковому матеріалу властиве переміщення вільних зарядів (електричний струм) під впливом електричного поля відповідно до закону Ома, що викликає магнітне поле та нагрівання провідника. Магнітному матеріалу властива здатність концентрувати магнітне поле, енергія та силова дія якого широко використовується в техніці.

Основна особливість посібника полягає в детальній структуризації навчального матеріалу для забезпечення більш зручних посилань в електронній версії, орієнтуючись на дистанційну форму навчання, а також в демонстрацією конкретних прикладів тісного взаємозв'язку властивостей різноманітних електротехнічних матеріалів з основами електротехніки.

Даний навчальний посібник сприяє студентам оволодіти знаннями та надає можливості визначати основи функціонування елементів та принципи побудови електроенергетичних, електротехнічних електромеханічних комплексів та систем з врахуванням властивостей електротехнічних матеріалів, що використовуються в цих системах.

# 1 ОСНОВНІ ЯВИЩА В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ ТА ЇХ ЗАКОНОМІРНОСТІ

Для вивчення основних властивостей електротехнічних матеріалів необхідно, перш за все, усвідомити силовий характер впливу на ці матеріали електричного і магнітного полів та сформулювати основні закономірності процесів, які пов'язані з цими полями.

## 1.1 Електричне поле

Якщо на певній відстані від заряджених тіл розміщений пробний заряд  $q$ , то на цей заряд діють сили. Простір існування цих сил називають електричним полем. Сила та енергія електричного поля зазвичай використовуються для накопичення та переміщення електричних зарядів.

### 1.1.1 Модель атома

Спрощена модель атома деякої речовини наведена на рисунку 1.1.

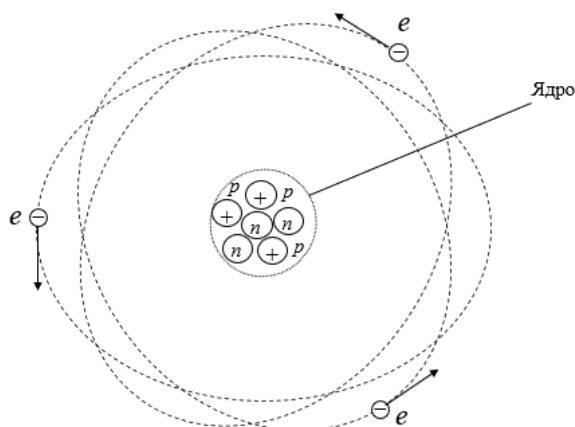


Рисунок 1.1 – Спрощена модель атома

За цією моделлю атом містить пов'язані між собою заряджені частинки – негативно заряджених електронів  $e$  масою  $9,11 \times 10^{-31}$  кг та позитивно зарядженого ядра (рис. 1.1). Електрони притягуються силами Кулона до ядра і дуже швидко обертаються навколо нього. Ядро

складається з нуклонів масою приблизно  $1,673 \times 10^{-27}$  кг – з позитивно заряджених протонів  $p$  і незаряджених (нейтральних) нейтронів  $n$ . Маса нейтрона перевищує масу протона на 0,138 %, оскільки ділиться на масу протона, електрона й антинейтрино при його бета-розпаді в ядрі. Маса електрона в 1836 разів менша маси нуклона. Тому маса атома, а значить і його енергія згідно з формулою Ейнштейна, сконцентрована в його ядрі. Числові значення зарядів електрона і протона однакові, тобто  $q_e = 1,602 \times 10^{-19}$  Кл. Діаметр атома дорівнює  $\sim 2 \times 10^{-10}$  м, а діаметр його ядра в сотні тисяч разів менший – близько  $10^{-15}$  м. Найбільш важливі властивості хімічного елемента визначаються кількістю протонів у складі ядра його атома. Кількість нейтронів у ядрі може змінюватись, створюючи відповідні ізотопи хімічного елемента, у тому числі нестабільні (радіоактивні) ізотопи.

### **1.1.2 Електричні заряди**

У нейтральному стані загальна кількість електронів у атомі (рис. 1.1) або в їх з'єднанні в молекули чи домени дорівнює загальній кількості протонів. Тому нейтральні атоми чи молекули з нульовим сумарним зарядом в електричному полі тільки деформуються.

Орієнтаційна взаємодія може виникати, коли усереднений центр електронів не співпадає з усередненим центром протонів, тобто коли молекула має дипольну будову.

Якщо кількість електронів відрізняється від кількості протонів, то така молекула втрачає свою електричну нейтральність і стає іоном. Таке може бути внаслідок тимчасової втрати молекулою електрона під впливом зовнішніх факторів (позитивний іон) або приєднання зайвого електрону (негативний іон).

Заряд тіла  $Q$  оцінюється в кулонах (Кл). Якщо величину  $Q$  оцінювати кількістю елементарних зарядів  $q_e = 1,602 \times 10^{-19}$  Кл (електронів або протонів), то заряд в один кулон складається відповідно з  $6,24 \times 10^{20}$  елементарних зарядів.

### 1.1.3 Силовий характер електричного поля

#### *Сила Кулона*

Головною властивістю електричного поля є сила взаємного притягання і відштовхування між, відповідно, різнойменно й однойменно зарядженими тілами. Ця сила називається силою Кулона. Наявність електричного поля визначається силою  $f$ , яка діє на пробний заряд  $q$  з боку одного або декількох заряджених тіл (рис. 1.2).

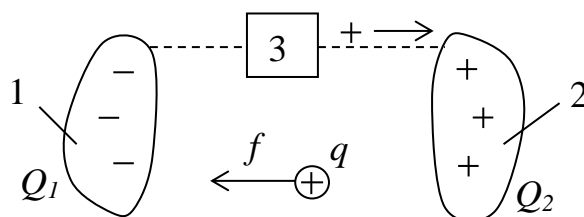


Рисунок 1.2 – Картина силового впливу

Сила Кулона здатна переміщувати у просторі вільні заряди  $q$ .

#### *Напруженість електричного поля*

Кількісною характеристикою силового впливу електричного поля в кожній його точці на пробний заряд  $q$  є напруженість поля  $E$  як векторна величина:

$$E = \frac{f}{q}, \quad (1.1)$$

де  $f$  – сила дії електричного поля в ньютонках (Н) на пробний заряд;

$q$  – величина пробного точкового електричного заряду в кулонах (Кл).

#### *Передача силового впливу електричного поля*

Якщо заряд  $Q$  тіла або його положення у просторі змінюється в часі  $t$ , то сила  $f$  та напруженість  $E$  в місці знаходження пробного заряду  $q$  теж змінюються, але з деякою затримкою в часі  $\Delta t$ . Ця затримка обумовлена відстанню  $l$  між електричним зарядом  $Q$  тіла і пробним зарядом  $q$  та кінцевою швидкістю передачі силової взаємодії, яка не перевищує швидкість світла  $c$ :

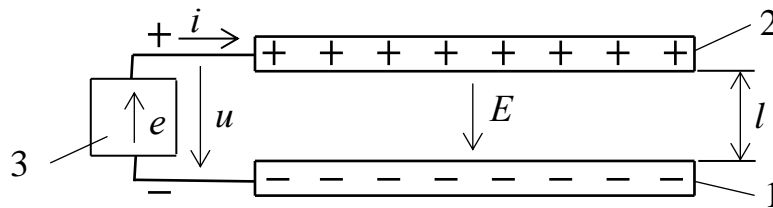
$$\Delta t \geq \frac{l}{c}. \quad (1.2)$$

Затримкою в часі  $\Delta t$  в електротехніці зазвичай нехтують. Але у разі великої відстані  $l$ , дуже швидких змін або великої частоти змін заряду  $Q$  врахування затримки  $\Delta t$  може стати принципово важливим.

### **1.1.4 Однорідне електричне поле**

#### ***Створення однорідного електричного поля***

В однорідному електричному полі напруженість поля  $E$  однакова в будь-якій його точці. Таке поле можна створити в центральній частині проміжку двома різнойменно зарядженими плоскими і паралельними між собою металевими пластинами чи обкладинками 1 і 2 (рис. 1.3). Обкладинки 1 і 2 можуть накопичувати (конденсувати) заряди завдяки їх підключенню до електричного джерела 3 з електрорушійною силою  $e$  та електричною напругою  $u$  на виході джерела.



**Рисунок 1.3 – Вигляд однорідного електричного поля**

Електрорушійна сила  $e$  і напруга  $u$  можуть бути постійними або змінними в часі.

#### ***Напруженість однорідного електричного поля***

Числове значення напруженості  $E$  однорідного електричного поля плоского конденсатора (рис. 1.3) можна визначити за формулою

$$E = \frac{u}{l}, \text{ В/м}, \quad (1.3)$$

де  $u$  – напруга електричного джерела (різниця потенціалів) у вольтах, завдяки якому на пластинах 1 і 2 може накопичуватись електричний

заряд  $Q$  (напруга в один вольт відповідає роботі в один джоуль, яку потрібно витратити для переміщення у просторі заряду в один кулон ( $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}$ );

$l$  – відстань між металевими пластинами 1 і 2 в метрах (м).

### ***Ємність плоского конденсатора***

Ємність конденсатора  $C$  характеризує здатність конденсатора накопичувати заряди  $Q$  і вимірюється фарадами (Ф). Один фарад відповідає заряду конденсатора в один кулон, який створює між обкладинками конденсатора електричну напругу в один вольт ( $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл}/1 \text{ В}$ ). Ємність плоского конденсатора пропорційна площі  $S$  його обкладинок, збільшується у міру посилення взаємодії між його обкладинками, а тому обернено пропорційна відстані  $l$  (рис. 1.3) і залежить від властивостей середовища:

$$C = \frac{Q}{u} = \frac{S\epsilon_a}{l}, \quad (1.4)$$

де  $\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$  – діелектрична проникність середовища між обкладинками конденсатора, Ф/м;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютна діелектрична проникність вакууму (повітря має практично таке саме значення абсолютної діелектричної проникності);

$\epsilon_r = \epsilon_a/\epsilon_0$  – відносна діелектрична проникність середовища між обкладинками конденсатора.

Елементарні заряди можуть накопичуватися (конденсуватися) не тільки внаслідок дії напруги  $u$  електричного джерела  $Z$ , але й під впливом інших явищ, наприклад, унаслідок тертя діелектричних матеріалів. У таких випадках напругу  $u$  слід розглядати вже як наслідок процесу накопичення зарядів.

## **1.1.5 Енергія електричного поля**

### ***Енергія електричного поля двох заряджених тіл***

Система заряджених тіл завдяки силовому характеру електричного поля здатна виконувати певну роботу на переміщення зарядів у

просторі (на створення електричного струму). Тому вона має енергію  $W_e$ , яка називається енергією електричного поля і вимірюється у джоулях (Дж). Зокрема, у разі наявності системи двох заряджених тіл 1 і 2 (рис. 1.2 або 1.3) цю енергію можна визначити через інтеграл елементарної роботи  $dA$  на створення електричного струму в процесі повного розрядження цієї системи від початкового значення заряду  $Q$  до нуля:

$$W_e = - \int_Q^0 dA = - \int_Q^0 u i dt = - \int_Q^0 \frac{q}{C} dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Qu}{2} = \frac{Cu^2}{2}, \quad (1.5)$$

де  $u=q/C$  – миттєве значення електричної напруги між обкладинками конденсатора, яка зменшується в процесі його розрядження від початкового значення  $u=Q/C$  до нуля;

$i$  – миттєве значення електричного струму в процесі розрядження, А;

$q$  – миттєве значення накопиченого заряду, що зменшується в процесі розрядження конденсатора від початкового значення  $Q$  до нуля;

$dq = i dt$  – елементарні величини заряду внаслідок його переміщення.

### **Об'ємна густина енергії електричного поля**

При аналізі електричного поля часто користуються об'ємною густиною енергії електричного поля  $w_e$  (Дж/м<sup>3</sup>). Величину  $w_e$  для плоского конденсатора можна визначити за такою формулою:

$$w_e = \frac{W_e}{V} = \frac{1}{V} \frac{Cu^2}{2} = \frac{1}{V} \frac{\epsilon_a S (El)^2}{2l} = \frac{\epsilon_a E^2}{2}, \quad (1.6)$$

де  $V=S \cdot l$  – об'єм простору, де існує однорідне поле плоского конденсатора;

$E=u/l$  – напруженість електричного поля, В/м (1.3).

### **Градiєнт енергії електричного поля**

Силу взаємодії заряджених тіл  $f$  можна визначити як швидкість зміни у просторі (як градієнт) енергії електричного поля:

$$f = - \frac{dW_e}{dx}, \quad (1.7)$$

де  $dW_e$  – елементарна зміна величини енергії електричного поля системи заряджених тіл унаслідок зміщення будь-якої компоненти цієї

системи на елементарну відстань  $dx$ . Знак “мінус” означає протидію сили  $f$  причині зміни енергії – причині зміщення компоненти системи цих тіл на елементарну відстань  $dx$ .

## 1.2 Електричний струм

Існує велике розмаїття електричних зарядів та їх переміщень – обертань електронів навколо своїх осей та ядра атомів (рис. 1.1). Це переміщення зарядів при радіоактивному розпаді ядра, теплові коливання зарядів, переміщення вільних зарядів під впливом електрорушійних сил, зміщення зв’язаних зарядів, інерційне переміщення звільнених зарядів. Кожен з цих видів переміщення при певних умовах може вважатись упорядкованим і називатись електричним струмом.

### 1.2.1 Упорядкований рух електричних зарядів

У більшості випадків упорядковане переміщення зарядів (електричний струм) розглядається як переміщення в у замкненому електричному колі між пластинами 1 і 2 вільних зарядів  $q$  під дією електрорушійної сили  $e$  електричного джерела 3 (рис. 1.2). Електричний струм зазвичай створюють електрони, які почергово залишають свої атоми і переходять на звільнені місця сусідніх атомів. Якщо матеріал кола має рідку чи газоподібну структуру, то у створенні електричного струмі беруть участь також позитивні і негативні іони. Переміщення іонів по суті означає рух речовини такого провідника, коли позитивні іони з одного боку, а негативні іони і електрони з іншого переміщуються в протилежні сторони. Якщо ж матеріал має тверду структуру, то переміщення іонів у цьому матеріалі дуже обмежене.

За позитивний напрям електричного струму прийнятий рух позитивних зарядів. Якщо ж носіями струму є негативні заряди (електрони), що зазвичай буває, то рух електронів протилежний напрямку електричного струму. Кількісну характеристику електричного струму прийнято визначати як величину зарядів  $q$ , які переткнули в певному напрямку поперечний переріз провідника електричного струму за одиницю часу  $t$ , тобто швидкість зміни зарядів у часі [3]:



$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (1.8)$$

де  $i$  – миттєве значення електричного струму в амперах (А),  $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/1 с}$ ;  
 $q$  – миттєве значення електричного заряду в кулонах (Кл).

### **1.2.2 Закон Ома**

Процесу переміщення електричних зарядів, тобто електричному струму, в електропровідному середовищі чиниться опір. У найбільш простих випадках, коли опір електричному струму створюють лише мікрочастинки середовища, виникає теплове поле з енергією  $W_T$ , яка розсіюється у просторі. У таких випадках закономірність цього процесу можна описувати законом Ома в найбільш простій його формі – в інтегральному вигляді для окремої ділянки електричного кола [3]:

$$i = \frac{u}{R}, \quad (1.9)$$

де  $i$  – електричний струм окремої ділянки електричного кола, А (1.8);  
 $u$  – електрична напруга чи різниця електричних потенціалів на окремій ділянці електричного кола у вольтах (В);  
 $R$  – активний опір електричному струму з боку цієї ділянки в омах (Ом), який впливає на процес виділення теплової енергії.

Електричний струм  $i$  може бути не тільки наслідком дії електрорушійної сили  $e$  чи електричної напруги  $u$  (1.9), але й причиною виникнення напруги, ( $u=i \cdot R$ ), а також фактором впливу на електричний опір ( $R=u/i$ ). Величина  $R$  в свою чергу може розглядатись як процес, що заважає переміщенню зарядів, як кількісна характеристика цього процесу, а також як елемент електричної схеми. Інколи відсутність елемента  $R$  в електричній схемі чи електричному колі може помилково сприйматись як нульове значення  $R$ , що призводить до парадоксального результату згідно формулі (1.9), бо не враховується внутрішній опір джерела напруги.

### **1.2.3 Теплова енергія електричного струму**

Теплова енергія  $W_T$ , яка протягом деякого часу  $t$  виділяється внаслідок подолання електричним струмом  $i$  активного опору  $R$  і потім передається в навколишнє середовище, визначається як [3]

$$W_T = \int_t ui dt = \int_t i^2 R dt = R \int_t i^2 dt = I^2 R t. \quad (1.10)$$

Якщо електричний струм  $i$  не змінюється в часі ( $i = I = \text{const}$ ), то формула (1.10) розрахунку теплової енергії, відповідно спрощується.

### **1.2.4 Діюче значення електричного струму**

Якщо електричний струм  $i$  змінюється в часі за періодичним (синусоїдальним) законом  $i(t) = I_m \sin \omega t$ , то в якості електричного струму  $I$  у формулі (1.10) за звичай розглядають діюче значення електричного струму:

$$I = \sqrt{\int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\int_0^T (I_m \sin \omega t)^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (1.11)$$

де  $I_m$  – амплітуда синусоїдального струму, А;

$\omega = 2\pi f$  – кутова частота зміни електричного струму, 1/с;

$f = 1/T$  – циклічна частота зміни електричного струму в герцах (Гц);

$T$  – тривалість циклу зміни електричного струму, с.

Діюче значення змінного струму визначається як значення постійного струму, який за один і той же проміжок часу, в одному і тому ж активному опорі виділяє таку ж кількість тепла, що і розглядуваний змінний струм.

Діюче значення напруги  $u$ , яка змінюється за синусоїдальним законом  $u = U_m \sin \omega t$ , можна розрахувати за формулою, аналогічною виразу (1.11).

### **1.2.5 Поняття реактивного опору**

У ситуаціях, коли енергія електричного або магнітного поля змінюється в часі, спостерігається реакція на цю зміну у виразі

реактивного падіння напруги і відповідного реактивного опору електричному струму без виділення теплової енергії [3, 4]. Наприклад, якщо в електричному колі змінного струму є ділянка у вигляді конденсатора ємністю  $C$ , то падіння напруги на цій ділянці згідно з формулою (1.4) і (1.8) можна записати так:

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt, \quad (1.12)$$

де  $i$  – зарядно-розрядний струм, який виникає лише при зміні в часі заряду  $q$  конденсатора (1.8) чи напруги  $u_c = q/C$ .

Зокрема, якщо електричний струм змінюється в часі за синусоїдальним законом  $i(t) = I_m \sin \omega t$ , то формула (1.12) набуває виду

$$u_c = I_m X_c \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = U_{cm} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (1.13)$$

де  $I_m$  – амплітуда зарядно-розрядного струму конденсатора, А;

$X_c = 1/\omega C$  – реактивний опір конденсатора (ємнісний опір) в омах (Ом);

$U_m = I_m \cdot X_c$  – амплітуда електричної напруги на обкладинках конденсатора, В;

$\pi/2$  – фазовий зсув напруги  $u_c$  відносно струму  $i$  (знак “мінус” означає відставання  $u_c$  від  $i$  за фазою на кут  $\pi/2$  або в часі  $t=T/4$  на чверть періоду  $T$  зміни електричного струму).

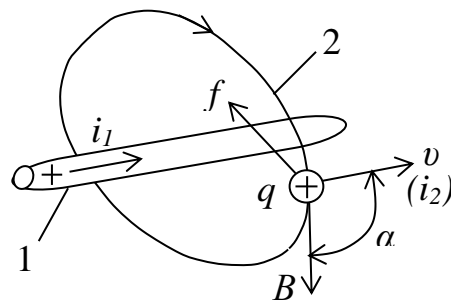
### 1.3 Магнітне поле

Якщо неподалік рухомих електричних зарядів або електричного струму розміщена стрілка магнітного компаса, то на неї діють сили, що підтверджується відповідним поворотом магнітної стрілки. Ці сили називають електродинамічними або магнітними, а простір їх існування – магнітним полем. Магнітні сили впливають не тільки на магнітну стрілку, але й на будь-які рухомі заряди. Магнітне поле зображують замкненими магнітними силовими лініями. Силовий характер

магнітного поля часто використовується на практиці – перш за все в електричних машинах [1, 2].

### **1.3.1 Магнітна індукція**

Магнітна індукція  $B$  визначає силовий характер магнітного поля навколо рухомих зарядів або навколо провідника 1 з електричним струмом  $i_1$ . Магнітна індукція  $B$  є векторною величиною і спричиняє силову дію  $f$  на рухомий заряд  $q$ . Напрямок вектора магнітної індукції  $B$  в деякій точці замкненого контуру 2 визначається за так званим правилом правоходового гвинта чи буравчика – перпендикулярно вектору електричного струму  $i_1$  в напрямку провертання гвинта, зорієнтованого за напрямком електричного струму  $i_1$  (рис. 1.4)



**Рисунок 1.4 – Схема визначення напрямку векторів магнітної індукції  $B$  та сили  $f$**

### **1.3.2 Сила Лоренца**

Силу дії  $f$  на рухомий точковий заряд  $q$  з боку магнітного поля називають силою Лоренца, яка діє додатково до сили Кулона (рис.1.4):

$$f = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (1.14)$$

де  $v$  – швидкість переміщення точкового заряду  $q$ ;

$B$  – числове значення магнітної індукції в теслах (Тл) як наслідок струму  $i_1$ ;

$\alpha$  – кут між вектором магнітної індукції  $B$  і вектором швидкості  $v$  (рис.1.4).

### **1.3.3 Сила Ампера**

Замість одного заряду  $q$  може бути безліч таких зарядів, що рухаються у тому самому напрямку. Якщо цей напрям задається іншим провідником струму  $i_2$ , то краще користуватися поняттям сили Ампера:

$$f = i_2 \cdot l_2 \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (1.15)$$

де  $l_2$  – довжина частини іншого провідника зі струмом  $i_2$ , яка знаходиться у магнітному полі з індукцією  $B$ ;

$\alpha$  – кут між вектором індукції  $B$  і напрямом електричного струму  $i_2$ .

Напрямок дії сили  $f$  на рухомі заряди чи провідник зі струмом визначають за так званим правилом лівої руки – напрям дії сили  $f$  покаже відставлений великий палець лівої руки, якщо вектор магнітної індукції  $B$  входить в долонь, а інші випрямлені пальці лівої руки напрямом струму  $i_2$ .

Зазвичай вважається, що сила Ампера діє на провідник зі струмом, який розміщений в магнітному полі. Але це має місце лише в однорідному магнітному полі. Насправді ж сила Ампера протидіє причині зміни магнітної енергії у просторі, і тому в деяких випадках сила Ампера майже не діє на такий провідник. Зокрема, в електричних двигунах і генераторах, де магнітне поле створюється у магнітопроводі і повітряному проміжку з різними властивостями, сила Ампера діє в основному на магнітопроводи, в яких нерухомо розміщені електричні провідники.

### **1.3.4 Магнітний потік**

Як інтегральна характеристика магнітних силових ліній використовується магнітний потік  $\Phi$  у веберах (Вб), який пронизує поверхню з обмеженою площею  $S$ . Якщо всі елементи  $dS$  цієї поверхні перпендикулярні вектору магнітної індукції  $B$ , то магнітний потік:

$$\Phi = \int_S B dS, \quad (1.16)$$

де  $B$  – магнітна індукція в деякій точці магнітного поля в теслах (Тл);  
 $S$  – загальна площа поверхні, яку пронизує магнітний потік  $\Phi$ .

Згадану поверхню  $S$  бажано вибрати так, щоб врахувати максимальну кількість магнітних силових ліній 2. Цю умову можна виконати, якщо провідник 1 зі струмом  $i$  розглядати як частину замкненого електричного кола у вигляді замкненого витка провідника (рис. 1.5). Тому поверхня  $S$  повинна бути обмежена витком провідника 1 з електричним струмом  $i$ . За таких умов прийнято вважати, що магнітний потік  $\Phi$  пронизує виток провідника з електричним струмом  $i$  або зчіплюється з цим витком (рис. 1.5).

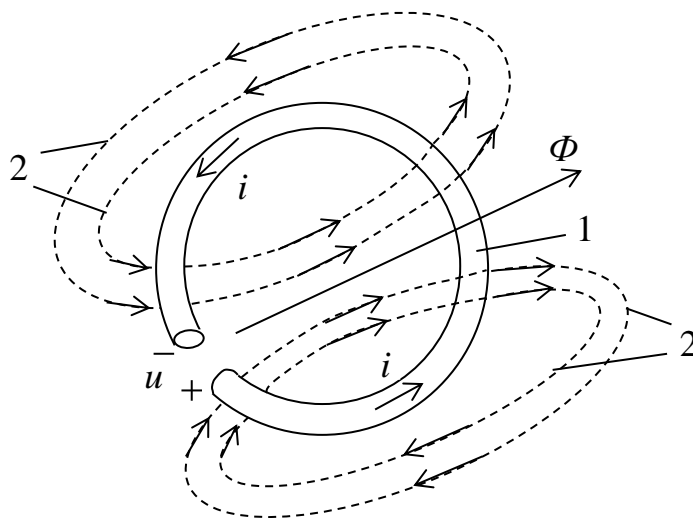


Рисунок 1.5 – Схема магнітного потоку провідника зі струмом

### *Залежність магнітного потоку від струму*

Залежність магнітного потоку  $\Phi_1$  від електричного струму  $i$  у разі використання одного витка провідника зі струмом (рис.1.5) має такий вираз:

$$\Phi_1 = L_1 \cdot i, \quad (1.17)$$

де  $L_1$  – індуктивність одного витка провідника в генрі (Гн).

### *Потокозчеплення. Індуктивність котушки*

Якщо магнітний потік  $\Phi$  створюється декількома витками провідника, то такий провідник називається  $N$ -витковою котушкою індуктивності. Магнітний потік  $\Phi$  такої котушки відповідно збільшується

майже в  $N$  разів відносно  $\Phi_1$  і до того ж зчіплюється з більшою кількістю витків котушки. У таких випадках краще користуватися, терміном потокозчеплення  $\Psi$ , яке майже в  $N$  разів більше магнітного потоку  $\Phi_1$  одного витка провідника з тим самим струмом  $i$ :

$$\Phi = \Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i \approx N\Phi_1 = Li, \quad (1.18)$$

де  $\Psi = \Phi$  – зчеплення потоку  $\Phi$  з  $N$  витками котушки (потокозчеплення), Вб;

$L \approx N^2 L_1$  – індуктивність  $N$ -виткової котушки, яка більше відносно  $L_1$  в  $N^2$  разів через збільшення в  $N$  разів потоку  $\Phi$  відносно  $\Phi_1$  і через збільшення в такій самій мірі кількості зчеплених з потоком  $\Phi$  витків (1.24).

### ***Напруженість магнітного поля***

Електричні струми і магнітне поле як наслідок цих струмів зазвичай діють у різних середовищах з принципово різними властивостями. Тому виникає потреба у використанні зв'язуючі величини посередника між електричними струмами та магнітною індукцією. Такою величиною є напруженість  $H$  магнітного поля, яка розглядається одночасно як наслідок дії електричних струмів і як причина магнітної індукції  $B$ , яка співпадає за напрямом з напруженістю  $H$  в кожній точці магнітного поля. Напруженість  $H$  діє в магнітному середовищі і не залежить від властивостей цього середовища, де діє магнітне поле. Такий підхід дозволяє скористатись аналогією з електричними колами і спростити таким чином аналіз магнітних кіл, з вектором магнітної індукції  $B$ .

### ***Закон повного струму***

Зв'язок між напруженістю  $H$  магнітного поля та електричними струмами визначається законом повного струму  $F$ . За цим законом лінійний інтеграл за замкненим контуром 2 (рис. 1.4 або рис. 1.5) від напруженості магнітного поля  $H$  дорівнює повному струму, що проходить через переріз обмежений цим контуром:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_k i_k = F, \quad (1.19)$$

де  $\vec{H} \cdot d\vec{l}$  – скалярний добуток векторів напруженості магнітного поля і елементарної ділянки замкненого контуру 2 (рис.1.4);

$l$  – довжина замкненого контуру 2;

$\sum_k i_k$  – алгебраїчна сума струмів, які охоплюються замкненим контуром 2 (цю суму називають намагнічуючою або магніторушійною силою виміряну, в амперах).

На практиці часто виникає ситуація, коли напруженість магнітного поля практично однакова за своїм числовим значенням у всіх точках замкненого контуру 2 і співпадає за напрямом з елементарними ділянками цього контуру. В таких ситуаціях формула (1.19) закону повного струму спрощується до вигляду:

$$H \cdot l \approx \sum_k i_k = F. \quad (1.20)$$

### ***Залежність магнітної індукції від магнітної напруженості***

Залежність магнітної індукції  $B$  від напруженості  $H$  магнітного поля визначається властивостями середовища, в якому створюється магнітне поле. В найпростішому випадку, коли середовище ізотропне за своїми магнітними властивостями, а швидкість зміни напруженості магнітного поля  $H$  незначна, залежність  $B(H)$  можна записати так [5-7]:

$$B = \mu_a \cdot H, \quad (1.21)$$

де  $\mu_a = \mu_r \cdot \mu_0$  – абсолютна магнітна проникність середовища, в якому створюється магнітне поле, Гн/м;

$\mu_0 = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2} = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – абсолютна магнітна проникність вакууму (повітря має практично таке саме, що й значення абсолютна магнітна проникність);

$\mu_r = \mu_a / \mu_0$  – відносна магнітна проникність середовища;

$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютна діелектрична проникність вакууму;

$c \approx 300$  тис. км/с – швидкість світла у вакуумі.



Абсолютна магнітна проникність  $\mu_a$  середовища часто є функцією магнітної індукції, і тому залежність (1.21) в загальному випадку є нелінійною.

### **1.3.5 Електромагнітна індукція**

#### ***Закон Фарадея***

Електромагнітна індукція – це явище виникнення електрорушійної сили  $e$  (ЕРС) в замкненому електропровідному контурі внаслідок зміни у часі магнітного потоку  $\Phi$ , що пронизує цей контур. Закономірність цього явища називається законом електромагнітної індукції або законом Фарадея:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.22)$$

Внаслідок дії ЕРС  $e$  в замкненому електропровідному контурі виникає електричний струм  $i$ , який, називають індукційним струмом. Цей струм умовно можна назвати вторинним струмом  $i_2$ , якщо первинним вважати електричний струм  $i_1$  як причину магнітного потоку  $\Phi$ . Залежність магнітного потоку  $\Phi_1$  від первинного струму  $i_1$  визначена наведеними вище формулами (1.16), (1.21) і (1.19). Таким чином, закон Фарадея встановлює магнітний взаємозв'язок між первинним та вторинним електричними струмами. При цьому електричний (гальванічний) зв'язок чи контакт між цими струмами може не існувати. Ця особливість використовується в електричних та електромагнітних пристроях.

Знак “мінус” у формулі (1.22) означає, що індукційний струм протидіє причині його виникнення, тобто протидіє змінам магнітного потоку  $\Phi$ .

#### ***Реактивний опір котушки індуктивності***

Якщо змінний магнітний потік  $\Phi_1(t)$  спричиняється змінним струмом  $i(t)$  в одному витку провідника, то ця протидія проявляється виникненням падіння напруги  $u_L$  в цьому провіднику:

$$u_{L1} = -e = \frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{d(L_1 i)}{dt} = L_1 \frac{di}{dt}, \quad (1.23)$$

де  $e$  – електрорушійна сила (ЕРС) самоіндукції у вольтах (В);

$L_1$  – індуктивність одного витка провідника; Гн;

$\Phi_1 = L_1 i$  – магнітний потік одного витка провідника змінного струму, (Вб).

Падіння напруги  $u_L$  на  $N$ -витковій котушці з тим самим струмом  $i$  збільшиться в  $N^2$  разів порівняно з одновитковою котушкою:

$$u_L = -e = \frac{d\psi}{dt} \approx N \frac{d\Phi}{dt} \approx N \frac{d(N\Phi_1)}{dt} \approx N^2 \frac{d(L_1 i)}{dt} = L \frac{di}{dt}, \quad (1.24)$$

де  $\Psi \approx N \cdot \Phi$  – потокозчеплення магнітного потоку  $\Phi$  з  $N$  витками котушки, Вб;

$\Phi \approx N \cdot \Phi_1$  – змінний магнітний потік  $N$ -виткової котушки, який збільшився майже в  $N$  разів відносно до потоку  $\Phi_1$  одного витка провідника;

$L \approx N^2 \cdot L_1$  – індуктивність  $N$ -виткової котушки.

Зокрема, якщо електричний струм змінюється в часі за періодичним (синусоїдальним) законом  $i(t) = I_m \sin \omega t$ , то формула (1.24) набуває вигляду

$$u_L = I_m X_L \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_{Lm} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (1.25)$$

де  $I_m$  – амплітуда електричного струму в котушці індуктивності, А;

$X_L = \omega L$  – реактивний опір котушки індуктивності, Ом;

$U_m = I_m \cdot X_L$  – амплітуда електричної напруги на котушці індуктивності, В;

$\pi/2$  – фазове випередження напруги  $u_L$  відносно струму  $i$ , яке по суті означає випередження в часі напруги  $u_L$  відносно струму  $i$  на чверть періоду.

### **1.3.6 Енергія магнітного поля**

Магнітне поле своїм силовим впливом на рухомі заряди (на електричний струм) здатне виконувати певну роботу і тому має магнітну енергію  $W_m$ , виміряну в джоулях (Дж). Розглянемо магнітну енергію  $W_m$ , яка накопичена в  $N$ -витковій котушці з індуктивністю  $L$  за

наявності в ній електричного струму  $i$ . Якщо таку котушку замкнути провідником і від'єднати від електричного джерела, то електричний струм у ній швидко, а значить протягом певного часу буде витрачена вся накопичена енергія  $W_m$ . Цю енергію можна визначити через інтеграл елементарної роботи  $dA$  на переміщення зарядів:

$$W_m = - \int_I^0 dA = - \int_I^0 u_L i dt = - \int_I^0 L \frac{di}{dt} i dt = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi NI}{2}, \quad (1.26)$$

де  $u_L$  – електрична напруга в котушці, яка виникає завдяки ЕРС самоіндукції під час зміни в ній електричного струму, В (1.24);

$L = N^2 L_1 = N^2 \Phi_1 / i = N \Phi / i$  – індуктивність  $N$ -виткової котушки, Гн (1.24);

$\Phi$  – початкове значення магнітного потоку, створеного електричним струмом  $i$  в  $N$ -витковій котушці.

### **Об'ємна густина енергії магнітного поля**

При аналізі магнітного поля доволі часто виникає потреба у визначенні об'ємної густини енергії магнітного поля  $w_m$  (Дж/м<sup>3</sup>) в окремих його точках:

$$w_m = \frac{dW_m}{dV} = \frac{d}{dV} \left( \frac{\Phi NI}{2} \right) = \frac{1}{2} \frac{d}{ds} \left[ \frac{d}{dl} \left( \int_S B dS \cdot \oint_l H dl \right) \right] = \frac{B \cdot H}{2}, \quad (1.27)$$

де  $dV = dS \cdot dl$  – елементарний об'єм простору, де існує магнітне поле, м<sup>3</sup>;

$\Phi = \int_S B dS$  – магнітний потік (1.16);

$NI = F = \oint_l H dl$  – намагнічуюча сила, А (1.19).

З формули (1.27) випливає висновок, що магнітне поле може існувати і характеризуватися, певною енергією  $W_m$  чи  $w_m$  навіть у разі відсутності електричного струму у звичайному розумінні цього терміну, якщо в магнітному матеріалі (наприклад, в постійному магніті) створена залишкова магнітна індукція  $B = B_r$ .

### Градiєнт енергії магнітного поля

Силу  $f$  взаємодії рухомих зарядів як основи існування магнітного поля можна розрахувати через швидкість зміни у просторі (через градієнт) енергії магнітного поля аналогічно визначенню сили електричного поля (1.7):

$$f = -\frac{dW_m}{dx}, \quad (1.28)$$

де  $dW_m$  – елементарна зміна енергії магнітного поля внаслідок зміщення будь-якого елемента системи рухомих зарядів чи магнітопроводу на елементарну відстань  $dx$ . Знак “мінус” означає протидію сили  $f$  причині зміни магнітної енергії, наприклад, причині зміщення системи рухомих зарядів на елементарну відстань  $dx$ .

Таким самим чином може бути визначений силовий вплив магнітного поля попередньо намагніченого постійного магніту на матеріали, які здатні намагнічуватись, наприклад, силу протягування магнітом залізних елементів.

## 1.4 Приклади розрахунку

### 1.4.1 Розрахунок сил електричного поля

**Завдання 1.** Розрахувати електростатичні сили взаємодії між зарядженими обкладинками плоского конденсатора. Його обкладинки мають форму квадрата площею  $S=2 \text{ м}^2$ , ізолювані між собою діелектриком з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_r=5$  і товщиною  $l=0,2$  мм, взаємно зміщені вздовж діелектрика на 10% відносно площі  $S$  (рис. 1.6) та мають залишковий заряд  $Q=200$  мкКл.

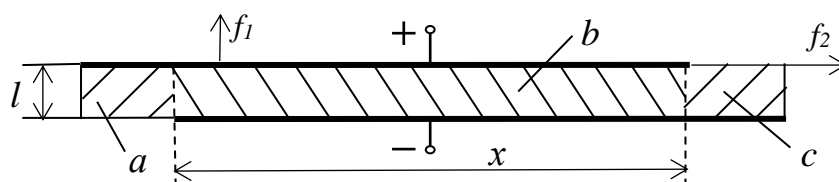


Рисунок 1.6 – До завдання

**Розв’язок.** Електростатичну силу  $f$  взаємодії між обкладинками конденсатора можна розрахувати як градієнт енергії електричного поля конденсатора (1.7). Сила  $f$  може мати дві складові: силу  $f_1$  внаслідок віддалення верхньої обкладинки конденсатора від нижньої (внаслідок збільшення відстані  $l$ ) на елементарну відстань  $dl$ , і силу  $f_2$  внаслідок зміщення верхньої обкладинки конденсатора вправо (внаслідок збільшення відстані  $x$ ) на елементарну відстань  $dx$  (рис. 1.6).

Враховуючи доволі малу товщину діелектрика порівняно з іншими розмірами конденсатора, можна вважати, що електричне поле сконцентроване в основному в зоні “ $b$ ”. Тому можна враховувати енергію електричного поля лише в зоні “ $b$ ”, нехтуючи енергією електричного поля в зонах “ $a$ ” і “ $c$ ”.

Користуючись формулами (1.4)-(1.7), отримаємо наступне значення сили  $f_1$  (рис. 1.6) в напрямку збільшення відстані  $l$  на елементарну величину  $dl$ :

$$\begin{aligned} f_1 &= -\frac{dW_e}{dl} = -\frac{d}{dl} \left( \frac{Cu^2}{2} \right) = \frac{d}{dl} \left( \frac{Q^2}{2C} \right) = -\frac{Q^2}{2} \frac{d}{dl} \left( \frac{l}{S_b \epsilon_r \epsilon_0} \right) = \\ &= -\frac{Q^2}{2S_b \epsilon_r \epsilon_0} = -\frac{(200 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 1,8 \cdot 5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = -251,1 \text{ Н}, \end{aligned}$$

де  $S_b = S \cdot 0,9 = 2 \cdot 0,9 = 1,8 \text{ м}^2$  – площа обкладинок конденсатора в зоні “ $b$ ”, яка за умови задачі на 1% менше площі  $S$ ;

$$C = \frac{S_b \cdot \epsilon_r \epsilon_0}{l} = \frac{1,8 \cdot 5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 398,25 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \text{ – ємність конденсатора;}$$

$u = Q/C = 200 \cdot 10^{-6} / 398,25 \cdot 10^{-9} = 502 \text{ В}$  – напруга між обкладинками конденсатора.

Значення сили  $f_1$  зі знаком “мінус” означає, що ця сила насправді спрямована в протилежну сторону – в напрямку зменшення відстані  $l$ , тобто верхня обкладинка конденсатора насправді притягується до відповідної нижньої.

Для розрахунку сили  $f_2$  потрібно врахувати те, що зона “ $b$ ” має форму прямокутника площею  $S_b = S \cdot 0,9 = 2 \cdot 0,9 = 1,8 \text{ м}^2$  зі сторонами  $y = \sqrt{S} = \sqrt{2} = 1,414 \text{ м}$  і  $x = S_b/y = 1,8/1,414 = 1,273 \text{ м}$ . Користуючись

формулами (1.4)-(1.7), отримаємо значення сили  $f_2$  в напрямку збільшення  $x$  на елементарну величину  $dx$ :

$$\begin{aligned} f_2 &= -\frac{dW_e}{dx} = -\frac{d}{dx}\left(\frac{Cu^2}{2}\right) = -\frac{d}{dx}\left(\frac{Q^2}{2C}\right) = -\frac{Q^2}{2} \frac{d}{dx}\left(\frac{l}{S_b \epsilon_r \epsilon_0}\right) = \\ &= -\frac{Q^2 l}{2y \epsilon_r \epsilon_0} \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\right) = \frac{Q^2 l}{2yx^2 \epsilon_r \epsilon_0} = \frac{(200 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,414 \cdot 1,273^2 \cdot 5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 0,0394 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Значення сили  $f_2$  зі знаком "плюс" означає, що ця сила діє на верхню обкладинку конденсатора в напрямку збільшення відстані  $x$ .

### **1.4.2 Розрахунок сил магнітного поля**

**Завдання.** Розрахувати силу взаємодії між двома паралельними провідниками довжиною  $l=1$  м і діаметром  $d=2$  мм з постійними або низькочастотними струмами  $i_1=i_2=50$  А різного напрямку дії, які розміщені діелектричному середовищі на відстані  $a=20$  мм між їх осями.

**Розв'язок.** Для спрощення розрахунку припустимо, що:  $a \gg d$ ,  $l \gg a$ , густина струму однакова у всіх точках перерізу провідників. За таких умов силу взаємодії (силу Ампера) між паралельними провідниками можна розрахувати за формулою (1.15):

$$\begin{aligned} f &= i_2 \cdot l \cdot B_1 \cdot \sin \alpha = i_2 \cdot l \cdot \mu_0 H_1 = i_2 \cdot l \cdot i_1 \frac{\mu_0}{2\pi \cdot a} = \\ &= 50 \cdot 1 \cdot 50 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot 0,02} = 0,025 \text{ Н,} \end{aligned}$$

де  $B_1 = \mu_a \cdot H_1$  – індукція магнітного поля, створеного струмом  $i_1$  першого провідника в точках розміщення другого провідника, Тл (1.21);

$H_1 = i_1 / 2\pi a$  – напруженість магнітного поля від струму  $i_1$  першого провідника в точках розміщення другого провідника, А/м (1.20).

$\alpha = \pi/2$  – кут між вектором індукції  $B$  і напрямком електричного струму  $i_2$ .

$\mu_a \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – абсолютна магнітна проникність діелектричного середовища.

Під дією цієї сили провідники з електричними струмами різного напрямку дії взаємно відштовхуються згідно з правилом лівої руки.

## 1.5 Контрольні запитання

1. Пояснить електричний заряд та одиницю його виміру. Що таке елементарний заряд?
2. За якою ознакою можна встановити існування зарядженої частинки чи тіла?
3. Визначить умови, за яких заряджена частинка може стати нейтральною.
4. Назвіть причини та умови накопичення чи конденсації електричних зарядів.
5. Сформулюйте зв'язок електричного заряду конденсатора з його електричною напругою та ємністю.
6. Опишіть електричне поле. Назвіть причини та умови виникнення електричного поля. За якою ознакою можна встановити існування електричного поля?
7. Охарактеризуйте напруженості електричного поля та поясніть одиницю її виміру.
8. Чим відрізняється однорідне електричне поле від неоднорідного електричного поля?
9. Який існує зв'язок напруженості електричного поля з електричним зарядом та силою дії поля на цей заряд?
10. Сформулюйте, як залежить залежність напруженість електричного поля плоского конденсатора від електричної напруги та відстані між його обкладинками?
11. Пояснить енергію електричного поля наведіть одиницю її виміру.
12. Яким чином може проявитись енергія електричного поля?
13. Що таке градієнт енергії електричного поля?
14. Сформулюйте, зв'язок який існує між енергією електричного поля та силою його дії на заряджені частинки.
15. Сформулювати залежність електричної енергії конденсатора від його електричної напруги та ємності.
16. Пояснить електричний струм, наведіть одиницю його виміру.
17. Опишіть залежність електричного струму в окремій ділянці електричного кола від електричної напруги та електричного опору цієї ділянки.
18. Який існує зв'язок між електричним струмом і електричним зарядом?
19. Які виникають явища при переміщенні електричних зарядів?

20. Поясніть енергію теплового поля, наведіть одиницю її виміру.
21. Які можуть бути причини виділення теплової енергії в електричному колі?
22. Яким чином може проявитись енергія теплового поля?
23. За якою формулою можна розрахувати енергію теплового поля на окремій ділянці електричного кола?
24. Опишіть магнітне поле. За якою ознакою можна встановити існування магнітного поля?
25. Назвіть причини та умови виникнення магнітного поля.
26. Поясніть індукцію магнітного поля та її зв'язок з магнітним потоком.
27. Охарактеризуйте напруженість магнітного поля та її зв'язок з магнітною індукцією.
28. Сформулюйте залежність напруженості магнітного поля від електричних струмів, які спричиняють магнітне поле.
29. Як визначити величину і напрям сили, з якою магнітне поле діє на провідник з електричним струмом і на окремі рухомі заряджені частинки?
30. Опишіть явище електромагнітної індукції.
31. Який існує зв'язок між змінним магнітним потоком та електрорушійною силою в замкненому електропровідному контурі?
32. Поясніть причини та умови виникнення індукційного струму.
33. Охарактеризуйте індуктивність котушки, наведіть одиницю її виміру.
34. Що таке потокозчеплення і як воно пов'язане з магнітним потоком та індуктивністю котушки?
35. Опишіть енергію магнітного поля наведіть одиницю її виміру. Яким чином може проявитись енергія магнітного поля?
36. Що таке градієнт енергії магнітного поля?
37. Сформулюйте зв'язок між енергією магнітного поля та силою його дії на рухомі заряджені частинки.
38. Чим відрізняється енергія магнітного поля від її об'ємної густини.
39. Сформулюйте залежність енергії магнітного поля від електричного струму котушки індуктивності та її індуктивності.
40. Які наслідки можуть бути при зміні енергії магнітного поля?



## 2 ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

*Діелектричні матеріали* або *діелектрики* (англ. *dielectric*, від дав.-гр. δια- – «через» + «електрика») – речовини, що не проводять електричний струм і питомий опір яких становить  $10^8 \dots 10^{17}$  Ом·см. У таких речовинах заряди не можуть пересуватися з однієї частини в іншу (зв'язані заряди). Зв'язаними зарядами є заряди, що входять до складу атомів або молекул діелектрика, заряди іонів, в кристалах з іонною ґраткою.

Головна особливість діелектричних матеріалів – це мала кількість вільних зарядів, здатних створювати електричний струм. Це дозволяє використовувати діелектрики як електроізоляційний матеріал за умови запобігання їх електричного пробою. Практично всі заряджені частинки діелектрика здатні лише зміщуватися під впливом сил електричного поля. Цей процес називається поляризацією діелектрика. Таким чином, електрична ізоляція та здатність поляризуватись є найбільш важливими властивостями діелектриків [5-7].

### 2.1 Поляризація діелектриків

Переходячи до розгляду явища поляризації, слід сказати про двох основних видах поляризації діелектриків:

– поляризація під впливом електричного поля практично миттєва, цілком пружна, без розсіювання енергії, тобто без виділення теплоти;

– поляризація, що здійснюється не миттєво, а наростаюча і спадна уповільнено і супроводжувана розсіюванням енергії в діелектрику, тобто його нагріванням. Такий вид поляризації називають *релаксаційною* поляризацією.

До першого виду поляризації відносяться *електронна* та *іонна*, інші механізми належать до релаксаційної поляризації. Особливим механізмом поляризації є *резонансна*, яка спостерігається в діелектриках при досить високих частотах.

Ємність конденсатора з діелектриком і накопичений в ньому електричний заряд обумовлюються сумарним впливом різних механізмів поляризації. Різні види поляризації можуть спостерігатися у різних діелектриках, а також можуть бути одночасно у одного і того ж матеріалу.

**Поляризація** – це процес зміщення зв’язаних електричних зарядів діелектрика під впливом сил електричного поля, який називають електричним струмом зміщення.

### **2.1.1 Основні види поляризації**

**Електронна поляризація** - це пружне зміщення орбіт електронів відносно ядер атомів діелектрика під впливом електричного поля за дуже короткий термін – близько  $10^{-15}$  с. Електронна поляризація виникає у будь-якому діелектрику незалежно від наявності інших видів поляризації. Втрат енергії електричного поля за повний цикл дії поля зазвичай не спостерігається.

**Іонна поляризація** – це пружне зміщення іонів діелектрика під впливом електричного поля. Вона характерна для твердих тіл з іонною будовою і протікає повільніше через більшу масу іонів – протягом  $\approx 10^{-13}$  с. Іонна поляризація відбувається без втрат енергії електричного поля. Однак, при не пружному зміщенні іонів можуть виникати втрати електричної енергії і нагрівання діелектрика. Така поляризація називається іонно-релаксаційною.

**Дипольна поляризація** – це орієнтація дипольних молекул діелектрика силами електричного поля. Вона характерна для полярних діелектриків і належить до уповільнених видів поляризації. Час поляризації складає від  $10^{-10}$  с до  $10^{-2}$  с. Поворот дипольних молекул під дією електричного поля потребує подолання сил внутрішнього “тертя” в речовині, що викликає втрати електричної енергії в діелектрику і нагрівання діелектрика.

**Дипольно-релаксаційна поляризація** властива полярним газам і рідинам. Цей вид поляризації може спостерігатись і в твердих поляр-

них органічних речовинах, але в цьому випадку поляризація, зазвичай, зумовлена вже не поворотом самої молекули, а поворотом наявних у ній полярних радикалів. Таку поляризацію називають **дипольно-радикальною**. Прикладом речовини з цим видом поляризації є целюлоза, полярність якої пояснюється наявністю гідроксильних груп - *ОН* і кисню.

**Йонно-релаксаційна поляризація** спостерігається в йонних діелектриках з нещільним пакуванням йонів, наприклад, в неорганічних стеклах і в деяких кристалічних речовинах. У цьому випадку слабо зв'язані йони речовини під дією зовнішнього електричного поля серед хаотичних теплових перекидань мають надлишкові перекидання в напрямку поля і зміщуються на відстані, що перевищують сталу ґратки. Після виключення електричного поля йони поступово повертаються до центрів рівноваги, тобто цей механізм можна віднести до релаксаційної поляризації, при якій має місце незворотне розсіювання енергії у вигляді тепла.

**Електронно-релаксаційна поляризація** виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових “дефектних” електронів або дірок. Слід відзначити відносно високе значення діелектричної проникності, яке може мати місце при електронно-релаксаційній поляризації, а також наявність максимуму в температурній залежності.

**Резонансна поляризація** спостерігається в діелектриках при світлових частотах. Вона залежить від фізико-хімічних особливостей речовини і може бути зв'язана з власною частотою електронів чи йонів або з характеристичною частотою дефектних електронів (при більш низьких частотах). Резонансна поляризація зв'язана з аномальною дисперсією світла і ще недостатньо вивчена.

**Міграційна поляризація** є додатковим механізмом поляризації, що проявляється у твердих тілах неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і наявності домішок.

Ця поляризація спостерігається при відносно низьких частотах і пов'язана зі значним розсіюванням електричної енергії. Причинами

виникнення такої поляризації є провідні та напівпровідні включення в технічних діелектриках, наявність шарів із різною провідністю і т.і.

При внесенні неоднорідних матеріалів в електричне поле вільні електрони та йони провідних та напівпровідних включень переміщуються в межах кожного включення, яке стає подібним до великої поляризованої молекули. У граничних шарах шаруватих матеріалів і в приелектродних шарах може мати місце накопичення зарядів повільних йонів, яке створює ефект міграційної поляризації. До міграційної можна віднести також йонно-релаксаційну поляризацію, при якій переміщення йонів здійснюється на відстані, що перевищують період ґратки.

Міграційна поляризація характерна для діелектриків, які мають домішки у вигляді дрібного порошку провідникових матеріалів. Під час дії електричного поля вільні електрони та іони електропровідних включень починають переміщуватися (мігрувати) в межах цих включень, накопичуватись і створювати таким чином поляризовані області. Цей процес досить повільний, може тривати секунди і навіть хвилини, супроводжується значними втратами енергії навіть при низькій частоті зміни електричного поля.

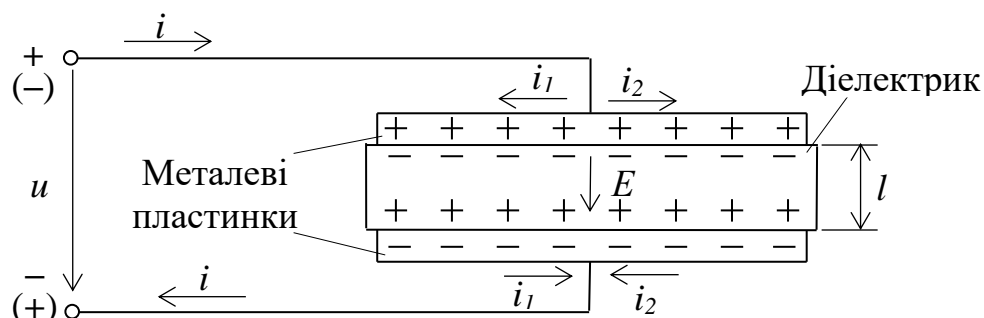
**Спонтанна (самочинна) поляризація** спостерігається у твердих нелінійних діелектриках з доменною структурою. У таких матеріалах є свої внутрішні поля, які створюють макроскопічні поляризовані області (домени). Дія зовнішнього поля сприяє переважній орієнтації цих доменів згідно з напрямком поля, що створює ефект дуже сильної поляризації. Самочинна поляризація діелектрика супроводжується значним його нагріванням. Діелектрична проникність  $\epsilon_r$  залежить від напруженості електричного поля та температури діелектрика нелінійно (з максимумом) і може в температурній залежності перевищувати значення 100000. Матеріали з таким видом поляризації називаються сегнетоелектриками.

### **2.1.2 Основні характеристики процесу поляризації**

Характерними ознаками процесу поляризації діелектриків є накопичення електричних зарядів за рахунок зміщення зв'язаних електричних зарядів під впливом сил електричного поля (1.4), а також деякі

втрати енергії в діелектрику при релаксаційній поляризації. Зазначені характеристики діелектриків залежать від діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат.

**Діелектрична проникність** діелектрика  $\epsilon_r$  визначається відносно абсолютної діелектричної проникності вакууму  $\epsilon_0$  (1.4). Для визначення відносної діелектричної проникності  $\epsilon_r$  діелектрик розміщують у змінному однорідному електричному полі конденсатора з плоскими паралельними зарядженими пластинами (рис. 2.1).



**Рисунок 2.1 – До визначення відносної діелектричної проникності діелектрика**

Принцип вимірювання відносної діелектричної проникності  $\epsilon_r$  діелектрика оснований на прямій залежності ємності конденсатора  $C$  від абсолютної діелектричної проникності  $\epsilon_a$  його діелектрика (1.4):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0}, \quad (2.1)$$

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

$C_0 = \epsilon_0 \cdot S/l$  – розрахункова ємність цього конденсатора в фарадах (Ф) з використанням вакууму замість досліджуваного діелектрика (1.4);

$C$  – ємність конденсатора з досліджуваним діелектриком, яку можна виміряти з допомогою вимірювального моста змінного струму (рис. 2.2);

$S$  – площа металевих обкладинок конденсатора, м<sup>2</sup>;

$l$  – товщина діелектрика, м (рис. 2.1).

У більшості випадків величина  $\varepsilon_r = \varepsilon_d / \varepsilon_0$  складає близько 2...10. Але для виготовлення малогабаритних конденсаторів з великою ємністю створюють спеціальні діелектрики з дуже великим значенням діелектричної проникності  $\varepsilon_r$  – від декількох сотень до декількох сотень тисяч [8].

Зміщені заряди поляризованого діелектрика можна вважати додатковими зарядами через їх здатність наводити вільні заряди протилежного знаку на металевих обкладинках конденсатора силами Кулона. Наведені заряди в свою чергу можуть вільно переміщуватись в провідниках за межами конденсатора. В деяких діелектриках поляризація та її зникнення може бути доволі сповільненою. Наприклад, для надійного розрядження відімкненого від електричного джерела висковольтного кабелю потрібно замикати його жили на доволі довгий час – протягом приблизно кількох хвилин.

**Діелектричні втрати** – це потужність  $P$  енергії, яка втрачається під впливом змінного електричного поля і приводить до нагрівання діелектрика:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi = U^2 \cdot \omega \cdot C \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \approx U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.2)$$

де  $U$  – діюче значення змінної (синусоїдальної) електричної напруги, прикладеної до обкладинок конденсатора з діелектриком, В (1.11);

$I$  – діюче значення змінного (синусоїдального) струму ззовні конденсатора, зумовленого процесом циклічного перезарядження конденсатора, А (1.11);

$\phi$  – кут фазового випередження струму  $I$  відносно напруги  $U$ , який менше  $90^\circ$  за величини  $\delta$  ( $\phi = 90^\circ - \delta$ ) через діелектричні втрати;

$\delta$  – кут діелектричних втрат;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс кута діелектричних втрат, який вимірюється за допомогою моста змінного струму (рис. 2.2);

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

$f$  – циклічна частота зміни напруги на обкладинках конденсатора, Гц;

$C = \varepsilon_r \cdot C_0$  – ємність конденсатора з досліджуваним діелектриком, яку можна виміряти за допомогою моста змінного струму (рис. 2.2).

Питомі діелектричні втрати

$$p = \frac{P}{V} = E^2 \omega \varepsilon_r \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta \text{ (Вт)}, \quad (2.3)$$

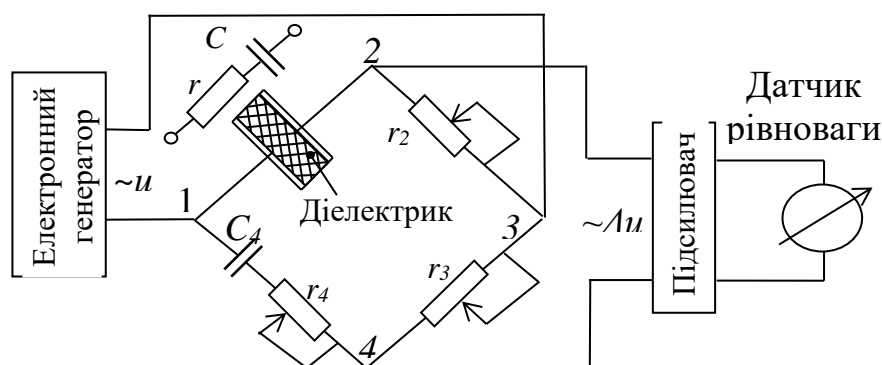
де  $V = S \cdot l$  – об’єм діелектрика, м<sup>3</sup>;

$E = U/l$  – напруженість електричного поля (1.3).

З формули (2.3) видно, що від величини  $\operatorname{tg} \delta$  залежать діелектричні втрати, які викликають нагрівання діелектрика, особливо при великих значеннях напруги  $U$  і частоти  $\omega$ . Тому діелектрики з малим значенням  $\operatorname{tg} \delta$  (менше  $5 \cdot 10^{-4}$ ) називають іноді високочастотними. Якщо частота  $f$  або напруга  $U$  невеликі, то можна використовувати низькочастотні діелектрики з відносно великими значеннями  $\operatorname{tg} \delta$ . Головною перевагою таких діелектриків може бути велике значення діелектричної проникності  $\varepsilon_r$  і малі габарити конденсаторів. Величина  $\operatorname{tg} \delta$  залежить від різних зовнішніх чинників – в першу чергу від температури, напруги та її частоти. Якщо напруга  $U$  незмінна в часі, то нагрівання діелектрика залежить від швидкості переміщення вільних зарядів, яких в діелектрику надзвичайно мало. В таких випадках діелектричними втратами нехтують.

### **Вимірювання діелектричної проникності і діелектричних втрат**

Діелектричну проникність  $\varepsilon_r$  і тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$  вимірюють за допомогою моста змінного струму при підключенні плоского конденсатора з досліджуваним діелектриком до джерела змінної напруги  $u$  (рис. 2.2). і тангенса кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$ .



**Рисунок 2.2 – Схема для визначення відносної діелектричної проникності  $\varepsilon_r$**

Вимірювальний міст змінного струму має чотири електричних плеча, одне з яких – плоский конденсатор з досліджуваним діелектриком і невідомими параметрами ( $r, C$  при послідовному їх з'єднанні або  $R, C_p$  при паралельному їх з'єднанні), а три інші – резистори і конденсатор ( $r_2, r_3, r_4, C_4$ ) з відомими параметрами (рис. 2.2).

У першу діагональ моста (між вузлами 1 і 3) подається від електронного генератора напруга  $u$ , яка змінюється з частотою  $\omega$  за синусоїдальним законом. Напруга на другій діагоналі моста  $\Delta u$  (між вузлами 2 і 4) підсилюється і контролюється датчиком рівноваги моста. Під час виміру резистори  $r_2, r_3, r_4$  регулюються з метою встановлення електричної рівноваги моста ( $\Delta u \approx 0$ ). У разі рівноваги моста виконується таке рівняння:

$$\left(r - j \frac{1}{\omega \cdot C}\right) \cdot r_3 = \left(r_4 - j \frac{1}{\omega \cdot C_4}\right) \cdot r_2, \quad (2.4)$$

де  $r, C$  – еквівалентні параметри конденсатора з досліджуваним діелектриком (опір  $r$  враховує наявність діелектричних втрат).

Рівняння (2.4) виконується за умови рівності його дійсних і уявних частин:

$$C = C_4 \frac{r_3}{r_2}; r = r_4 \frac{r_2}{r_3}. \quad (2.5)$$

Значення відносної діелектричної проникності  $\varepsilon_r$  можна визначити за формулами (2.1) і (2.5), а значення тангенса кута діелектричних втрат  $tg \delta$  – за наведеною нижче формулою, яка випливає з виразу (2.5):

$$tg \delta = \omega \cdot r \cdot C = \omega \cdot r_4 \cdot C_4. \quad (2.6)$$

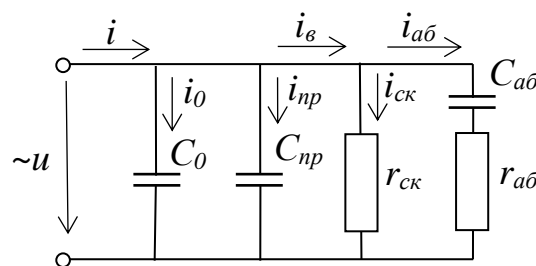
Конструкція вимірювального моста змінного струму передбачає автоматичне використання наведених формул і дозволяє таким чином отримати готовий результат виміру  $C$  і  $tg \delta$  за умови встановлення рівноваги цього моста.

Для діелектриків з великими значеннями  $tg \delta$  у вимірювальному мості передбачений другий діапазон виміру  $tg \delta$ , в якому



використовується інша схема заміщення конденсатора з досліджуваним діелектриком – у вигляді паралельного з’єднання інших за значеннями елементів  $R$  і  $C_p$ . Переключення мосту в другий діапазон не впливає на результати виміру  $tg\delta$ , але дещо впливає на результати виміру ємності  $C_p = C/(1 + tg^2\delta)$ , а значить і на визначення діелектричної проникності  $\epsilon_r$  [5].

**Еквівалентна схема діелектрика**, який знаходиться під впливом змінного електричного поля, зображена на рис. 2.3 [5-7].



**Рисунок 2.3 – Еквівалентна схема діелектрика**

У цій схемі використані такі елементи, які враховують найбільш важливі особливості процесів, що відбуваються в діелектрику:

$C_0$  – ємність конденсатора без діелектрика, до обкладинок якого підводиться змінна електрична напруга  $u$  для створення в діелектрику змінного електричного поля. Накопичення чи перезарядження ємності  $C_0$  здійснюється електричним струмом  $i_0$  практично миттєво і без діелектричних втрат. Цю ємність можна визначити за формулою (1.4);

$C_{np}$  – додаткова ємність конденсатора, яка обумовлена пружними видами поляризації діелектрика – електронною та іонною поляризацією. Накопичення чи перезарядження конденсатора  $C_{np}$  здійснюється електричним струмом  $i_{np}$  також практично миттєво і без діелектричних втрат. Ця ємність у  $\epsilon_r - 1$  раз більша, ніж  $C_0$ ;

$C_{аб}$  – додаткова ємність конденсатора, яка обумовлена уповільненими (релаксаційними) видами поляризації діелектрика – дипольною, міграційною та самочинною (спонтанною). Зарядження чи перезарядження  $C_{аб}$  здійснюється струмом абсорбції  $i_{аб}$  дуже сповільнено (в

деяких випадках протягом декількох хвилин) і з доволі великими діелектричними втратами. Ця ємність може бути значно більша, ніж  $C_0$  і  $C_{np}$ ;

$r_{аб}$  – електричний опір, який враховує наявність діелектричних втрат внаслідок сповільнених (релаксаційних) видів поляризації діелектрика;

$r_{ск}$  – електричний опір, який враховує деяку кількість вільних зарядів у середині і на поверхні діелектрика. Ці заряди спричиняють наскрізний електричний струм  $i_{ск}$ , який разом зі струмом абсорбції  $i_{аб}$  створюють струм витікання  $i_v$ .

### ***Електричні струми при поляризації діелектрика***

Процес поляризації діелектрика під впливом сил електричного поля конденсатора (сил Кулона) супроводжується не тільки зміщенням зв'язаних електричних зарядів, але й наведенням і відповідним переміщенням вільних зарядів, тобто електричним струмом, за межами діелектрика. Якщо цей процес часто повторюється, то електричний струм за межами діелектрика конденсатора збільшується пропорційно цій частоті. Вказаний процес наведення і переміщення вільних зарядів зберігається навіть у тих випадках, коли у просторі між обкладинками конденсатора практично відсутні заряджені частинки, тобто знаходиться вакуум чи повітря.

### ***Зарядно-розрядний струм у процесі поляризації діелектрика***

У більшості випадків до обкладинок конденсатора подається змінна напруга  $u$ , яка зазвичай змінюється за синусоїдальним законом  $u(t) = U_m \sin \omega t$ . Це супроводжується зарядно-розрядним струмом, діюче значення якого можна розрахувати за законом Ома:

$$I = \frac{U}{X_c}, \quad (2.7)$$

де  $U$  – діюче значення змінної напруги (1.11) на обкладинках конденсатора, В;

$X_c = 1/\omega C$  – реактивний опір конденсатора, Ом (1.13).

З формули (2.7) може створитися помилкове враження про здатність діелектрика пропускати доволі великий струм  $I$ , хоча в ньому практично відсутні вільні заряди, а також про порушення першого закону Кірхгофа. Наприклад, якщо в деякий момент часу заряди входять в обкладинку конденсатора з боку електропровідної частини замкненого кола, то за цим законом у цей самий момент заряди повинні начебто виходити з неї в бік діелектрика. Але такого не може бути через відсутність вільних зарядів у діелектрику. Насправді ж, заряди виходять не в бік діелектрика, а в різні боки цієї саме обкладинки, на що не завжди звертають увагу [9]. На рисунку 2.1 зображені струми  $i_1$ ,  $i_2$  як складові струму  $i$  за першим законом Кірхгофа.

### 2.1.3 Передача у просторі силового впливу електричного поля

Розглянемо процес періодичного перезарядження конденсатора (рис.2.1), в якому відстань  $l$  між обкладинками може бути дуже великою. Навіть у дуже віддаленій металевій обкладинці такого “конденсатора” зарядно-розрядний струм виникає при включенні джерела змінного струму і зникає при виключенні цього джерела [9]. Зрозуміло, що цей струм дуже малий при великих відстанях  $l$ , але за певних обставин може бути контрольованим. Це означає можливість передачі контрольованих електричних сигналів чи інформації на велику відстань у повітрі чи космічному просторі без електричних провідників (рис. 2.4).

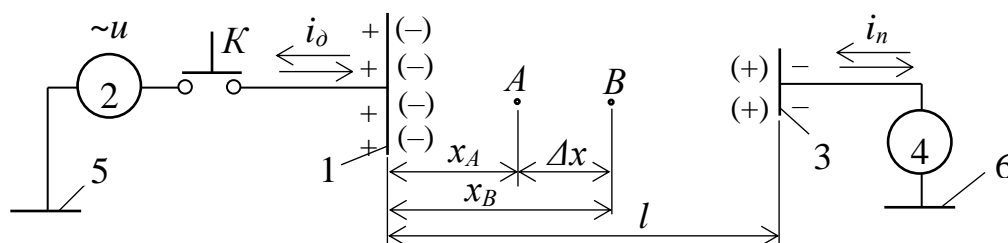


Рисунок 2.4 – Схема передачі інформації у просторі змінним електричним полем

Одна з металевих обкладинок 1 “конденсатора” виконує роль антени передавача сигналів від джерела 2 змінного струму  $i_\delta$ , а інша металева обкладинка 3 – роль приймальної антени. Якщо замкнути ключ  $K$ , то обкладинка 1 заряджається від джерела 2 струмом  $i_\delta$ , наприклад,

спочатку позитивними зарядами. Ці заряди вступають в силу взаємодію із зарядами інших матеріальних тіл, у тому числі із зарядами приймальної антени 3, і притягують негативні заряди відповідно до закону Кулона. При цьому вважається, що ця сила діє по прямій лінії, яка з'єднує антени 1 і 3. Внаслідок цього антена 3 заряджається негативними зарядами, що супроводжується відповідним електричним струмом  $i_n$  приймача 4 сигналів. Аналогічним чином відбувається процес взаємодії зарядів антен 1 і 3 при їх перезарядженні. Зникнення струму  $i_n$  може свідчити про розмикання ключа К. Саме в цьому і полягає принцип передачі інформації на велику відстань у вигляді змінних електричних сигналів. Таку передачу інформації прийнято називати передачею радіосигналів. Заземлення 5 і 6 у цій схемі (рис. 2.4) не є обов'язковим, а лише дозволяє отримати більший за рівнем сигнал приймача  $i_n$ .

Головною умовою перезарядження такого “конденсатора”, а значить передачі інформації на відстань, є зміна в часі струму  $i_\partial$  як за величиною, так і за напрямом. Найбільш природнім законом зміни струму  $i_\partial$  є синусоїдальний закон.

### ***Хвильовий характер змінного електричного поля***

Якщо силу Кулона контролювати в двох точках А і В на відстані  $x_A$  і  $x_B$  від первинного джерела змінних зарядів (від антени 1), то в разі синусоїдального закону струму  $i_\partial$  сила Кулона  $f_B$  в точці В буде змінюватися з деякою затримкою в часі  $\Delta t$  порівняно із силою Кулона  $f_A$  в точці А (рис. 2.4):

$$\begin{aligned} f_A &= F_{mA} \sin(\omega t); \\ f_B &= F_{mB} \sin(\omega t - \phi), \end{aligned} \quad (2.8)$$

де  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота електричного струму  $i_\partial$  і сили Кулона, 1/с;  
 $f = 1/T$  – циклічна частота електричного струму  $i_\partial$  і сили Кулона, Гц;  
 $T = \lambda/v$  – тривалість циклу чи періоду коливань електричного струму  $i_\partial$  і сили Кулона, с;

$v$  – швидкість розповсюдження у просторі силового впливу електричного поля, яка не може перевищувати швидкість світла у вакуумі  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с;

$\lambda$  – відстань, на яку розповсюджується силовий вплив протягом одного періоду коливань  $t=T$  (величину  $\lambda$  прийнято називати довжиною хвиль);

$\varphi = \omega \Delta t$  – фазовий зсув синусоїдальних сил Кулона;

$\Delta t = \Delta x/v = (x_B - x_A)/v$  – затримка в часі процесу передачі силового впливу електричного поля у просторі (1.2), яка обумовлена різницею у відстані  $\Delta x$  між точками А і В та обмежене швидкістю  $v$ .

Закон зміни зарядно-розрядного струму  $i_d$  може бути будь-яким – не обов’язково синусоїдальним. Несинусоїдальний струм  $i_d$  за бажанням можна розглядати як суму синусоїдальних струмів (гармонік) і розглядати як кожну з цих гармонік окремо.

Процес розповсюдження силового впливу електричного поля для зручності подають (моделюють) у вигляді переміщення радіохвиль довжиною  $\lambda = T \cdot v$  зі швидкістю  $v$ , близькою до швидкості світла  $c$  у вакуумі. Насправді ж, спостерігається вплив сили Кулона на заряди матеріальних частинок, які зустрілися на шляху розповсюдження цієї сили і які коливаються з періодичністю коливання сили Кулона.

#### **2.1.4 Поняття електромагнітного поля**

Перезарядження обкладинок конденсатора чи антени супроводжується електричним струмом, а значить магнітним полем. Магнітне поле також має також впливає на силовий характер впливу на електричні заряди матеріальних частинок (див. підрозділи 1.3.1...1.3.3). Силовий вплив магнітного поля обумовлений електрорушійною силою (ЕРС) відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея (1.22) та силою Лоренца (1.14) чи Ампера (1.15). ЕРС діє з боку змінного магнітного поля антени 1 на будь-які заряди антени 3, у той час як сила Лоренца або Ампера діє лише на рухомі заряди антени 3. Силовий вплив магнітного поля розповсюджується у просторі аналогічно силовому впливу електричного поля.

Змінні електричні і магнітні поля настільки тісно взаємопов’язані, що їх зазвичай розглядають як єдине електромагнітне поле. Коливання електромагнітних сил цього поля розповсюджуються у будь-якому просторі з обмеженою швидкістю, в тому числі у вакуумі. Матеріальні частинки простору здатні лише заважати процесу

розповсюдження електромагнітних коливань або змінювати напрям їх розповсюдження.

Електромагнітні коливання виникають внаслідок коливань чи змін положення заряджених частинок в електричних колах або у складі атомів чи ядра. Навіть зникнення заряджених частинок, наприклад, електронів внаслідок їх анігіляції є дуже швидкою зміною заряду, і тому супроводжується високочастотними коливаннями електромагнітних сил – анігіляційними гама-квантами. Електромагнітні коливання, які за звичай називають електромагнітними хвилями, поділяють на декілька діапазонів частоти  $f$  або довжини хвиль  $\lambda$  в залежності від характеру їх взаємодії із середовищем:

- радіохвилі ( $f < 3 \dots 3 \cdot 10^{11}$  Гц,  $\lambda = 10^4 \dots 10^{-3}$  м);
- інфрачервоні промені ( $f = 3 \cdot 10^{11} \dots 3,85 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\lambda = 10^{-3} \dots 7,8 \cdot 10^{-7}$  м);
- видиме світло ( $f = 3,85 \cdot 10^{14} \dots 7,89 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\lambda = 7,8 \cdot 10^{-7} \dots 3,8 \cdot 10^{-7}$  м);
- ультрафіолетові промені ( $f = 7,89 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$  Гц,  $\lambda = 3,8 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-8}$  м);
- рентгенівські промені ( $f = 3 \cdot 10^{16} \dots 6 \cdot 10^{19}$  Гц,  $\lambda = 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-12}$  м);
- гамма-промені ( $f > 6 \cdot 10^{19}$  Гц,  $\lambda < 5 \cdot 10^{-12}$  м).

Якщо на шляху розповсюдження силового впливу електромагнітного поля знаходиться матеріальний об'єкт, то в ньому відбувається часткове поглинання енергії електромагнітного поля та переміщення заряджених частинок аналогічно переміщенню зарядів у антені 3 приймача (рис. 2.4). Тому цей об'єкт може стати джерелом вторинних чи віддзеркалених електромагнітних хвиль, які можуть контролюватися прийомною антеною 3 і приймачем 4 (рис. 2.4). Прийняті вторинні електромагнітні хвилі можна використовувати для контролю місця знаходження матеріального об'єкта (наприклад, при радіолокації літака), при контролі температури поверхні до інфрачервоного випромінювання або при гама-локації. Процес прийняття частково поглинених прямих електромагнітних хвиль може бути використаний для визначення місця знаходження літака завдяки контролю частково поглинення гама-променів космічного походження, а також гама-контролю рівня матеріалів у технологічній ємності.

## 2.2 Електропровідність діелектриків

Електропровідність діелектрика проявляється наскрізним електричним струмом  $i_{ск}$  (рис. 2.3) і обумовлена наявністю вільних електричних зарядів. Для визначення електропровідності діелектрик розміщують в електричному полі між металевими провідниками і вимірюють величину електричного струму витіку  $i_e$ . Електропровідність діелектрика визначають при використанні постійної електричної напруги  $u$  через можливий вплив зарядно-розрядних струмів  $i_0$ ,  $i_{np}$ ,  $i_{аб}$ . З моменту підведення цієї напруги струми  $i_0$ ,  $i_{np}$  майже миттєво зникають, а струм абсорбції  $i_{аб}$  знижується в часі  $t$  поступово (рис. 2.5). Тому при визначенні електропровідності діелектрика потрібно почекати деякий час  $t_n$  (близько хвилини) після подачі напруги  $u$ , коли струм абсорбції  $i_{аб}$  знизиться практично до нуля, а струм витіку  $i_e = i_{аб} + i_{ск}$  знизиться до  $i_{ск}$ .

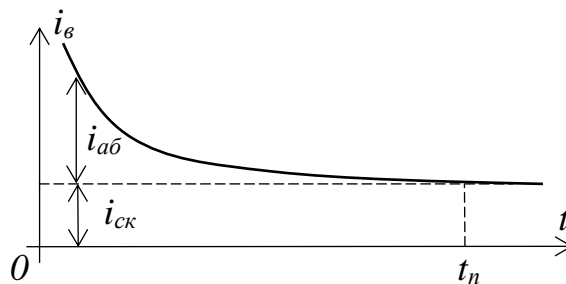
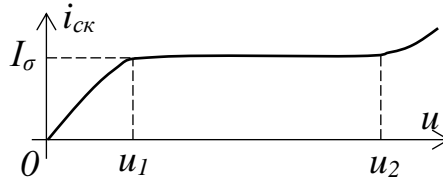


Рисунок 2.5 – Залежність струму витікання через діелектрик від часу

### 2.2.1 Електропровідність газоподібних діелектриків

Електропровідність газоподібних діелектриків може виникати внаслідок іонізації нейтральних молекул, тобто розщеплення молекул на вільні іони та електрони або електричного пробою. Іонізація може відбуватися під впливом зовнішніх факторів (внаслідок значного нагрівання газу, ультрафіолетового, рентгенівського, радіоактивного, космічного чи гама-випромінювання) а в сильних електричних полях внаслідок ударної іонізації.

На рисунку 2.6 зображена залежність наскрізного струму  $i_{ск}$  від електричної напруги  $u$ , прикладеної до металевих електродів чи обкладок конденсатора.



**Рисунок 2.6 – Залежність наскрізного електричного струму  $i_{ck}$  газоподібного діелектрика від електричної напруги  $u$**

На початковій ділянці наведеного графіка при  $u < u_1$  спостерігається практично лінійна залежність  $i_{ck}$  від  $u$  завдяки наявності вільних іонів та електронів, які не встигли рекомбінувати. При  $u_1 < u < u_2$  практично всі вільні заряди задіяні в електричному струмі  $i_{ck}$ , і тому цей струм досягає струму насичення  $I_\sigma$ . Зокрема, у повітрі струм  $i_{ck}$  при звичайних умовах досягає величини  $I_\sigma$  при відстані між електродами  $l = 10$  мм і напруженості електричного поля  $0,6$  В/м. Густина цього струму – приблизно  $10^{-15}$  А/м<sup>2</sup> [5]. Лише при  $u > u_2$  відбувається подальше зростання струму  $i_{ck}$  під впливом ударної іонізації та емісії електронів з поверхні металевих електродів. При дуже великих значеннях напруги  $u$  відбувається електричний пробій діелектрика.

Графік на рисунку 2.6 демонструє можливість практичного використання електропровідності газоподібних діелектриків для контролю інтенсивності іонізуючого випромінювання радіоактивних речовин шляхом вимірювання електричного струму насичення  $I_\sigma$  при напрузі  $u_1 < u < u_2$ . Іншим прикладом широкого використання електропровідності повітря є електрична дуга, висока температура якої дозволяє різати, плавити або зварювати метал.

Здатність повітря проводити електричний струм у більшості випадків слід розглядати як негативну його властивість. Зокрема, внаслідок розриву кола електричного струму у повітрі виникають електричні розряди, які здатні призвести до вибуху газу чи пожежі. Тому у вибухонебезпечних приміщеннях чи зонах доводиться запроваджувати відповідні запобіжні заходи. Як такі можуть бути використані технічні пристрої запобігання іскрінню, які діють за принципом упередженого та примусового виключення електричного струму.



При розгляді вакууму як дуже розрідженого газоподібного діелектрика можуть скластися суперечливі враження. З одного боку, ідеальний вакуум через відсутність у ньому матеріальних частинок може розглядатись як ідеальний електричний ізолятор. Але при високих напруженостях поля починається емісія електронів з катода і замість вакууму ми маємо дуже розріджену плазму, що стає провідником. З іншого ж боку, нездатність вакууму чинити опір рухомим зарядам внаслідок практичної відсутності зіткнень частинок між собою, надає «надпровідникові» властивості вакууму. Відмінністю «надпровідникових» властивостей вакууму від справжніх надпровідників є те, що для проходження струму потрібно весь час генерувати заряджені частинки, в той час як у справжніх надпровідниках носії заряду можуть забезпечувати нескінченне протікання струму без використання чи підведення зовнішньої енергії. Прикладами використання «надпровідникових» властивостей вакууму можуть бути електровакуумні прилади в електроніці, телевізійні електронно-променеві трубки, прискорювачі елементарних частинок. У природі найбільш поширеним явищем переміщення зарядів у вакуумі є так званий сонячний вітер – потік високоенергетичних іонізованих частинок Сонця зі швидкістю 300-1200 км/с. Цей потік зарядів здатний викликати на Землі магнітні бурі, іонізувати верхні шари атмосфери і навіть зносити молекули атмосфери у відкрий космос.

### **2.2.2 Електропровідність рідких діелектриків**

Електропровідність рідких діелектриків тісно пов'язана з молекулярною будовою рідини та присутністю домішок [5]. Електричний струм створюють в основному іони та заряджені колоїдні частинки. Особливо велика електропровідність спостерігається у тих діелектриків, які містять багато молекул полярної (дипольної) будови. Найбільш поширеним способом очищення рідкого діелектрика є видалення вологи, тобто його просушування. При тривалій дії електричного поля іони можуть осідати на електродах і нейтралізуватися, що призведе до деякого очищення діелектрика від домішок. Електропровідність рідкого діелектрика зростає з підвищенням температури внаслідок зниження його в'язкості, збільшення рухливості іонів та підвищення інтенсивності дисоціації молекул рідини.

Залежність наскрізного електричного струму  $i_{ск}$  від напруги  $u$  в рідкому діелектрику має нелінійний характер, як і в газоподібних діелектриках (рис. 2.6), але без явно виділеної ділянки насичення струму.

Найбільш поширеним у використанні рідким діелектриком є трансформаторне масло. Його питомий опір при температурі  $+20^{\circ}\text{C}$   $\rho \approx 10^{10} \dots 10^{13}$  Ом·м, а відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r \approx 2,2$  [5...8].

### **2.2.3 Електропровідність твердих діелектриків**

Електропровідність твердих діелектриків обумовлена переміщенням в основному слабо закріплених іонів випадкових домішок та іонів самого діелектрика, особливо при високих температурах. Деякі діелектрики володіють електронною, електропровідністю, особливо в сильних електричних полях. Характерною ознакою іонної електропровідності є перенесення електричним струмом деякої кількості речовини, яка відкладається на електродах. Вільні заряди можуть виникати не тільки в середині діелектрика (в його об'ємі), але й в тонкому шарі вологи та забруднень на його поверхні. Тому в твердих діелектриках розрізняють об'ємну та поверхневу електропровідності.

Поверхнева електропровідність виникає через здатність діелектрика адсорбувати на своїй поверхні вологу і пил. Гладенька поверхня діелектрика адсорбує менше вологи і забруднюючих речовин, особливо якщо діелектрик неполярний. При підвищенні температури діелектрика зростає рухливість його вільних іонів та їх концентрація завдяки тепловій дисоціації молекул, що викликає зростання електропровідності.

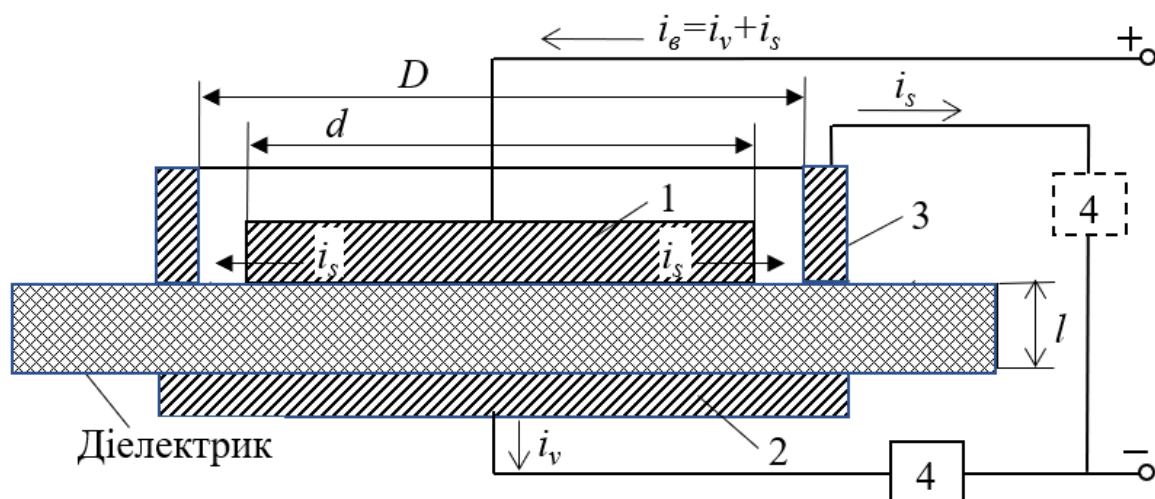
За величинами питомого об'ємного  $\rho_v$  і питомого поверхневого  $\rho_s$  опорів (або питомої об'ємної  $\gamma_v$  і питомої поверхневої  $\gamma_s$  електропровідності) діелектрики умовно поділяють на три основні групи:

- високоякісні ( $\rho_v=1/\gamma_v=10^{13} \dots 10^{16}$  Ом·м,  $\rho_s=1/\gamma_s=10^{14} \dots 10^{16}$  Ом);
- якісні ( $\rho_v=1/\gamma_v=10^9 \dots 10^{12}$  Ом·м,  $\rho_s=1/\gamma_s=10^{10} \dots 10^{13}$  Ом);
- задовільні ( $\rho_v=1/\gamma_v=10^6 \dots 10^8$  Ом·м,  $\rho_s=1/\gamma_s=10^8 \dots 10^9$  Ом).

### **2.2.4 Вимірювання електричного опору твердих діелектриків**

Вимірювання об'ємного  $R_v$  і поверхневого  $R_s$  опорів діелектрика необхідно проводити при постійній напрузі і з деякою затримкою в часі

(близько однієї хвилини), доки не зникне зарядно-розрядний струм в електродах. Для виміру  $R_v$  та  $R_s$  використовують зазвичай три електроди циліндричної форми, за допомогою яких розділяють загальний електричний струм витoku  $i_e$  на дві його складові – на об’ємний  $i_v$  і поверхневий  $i_s$  (рис. 2.7).



**Рисунок 2.7 – Схема відокремлення об’ємного і поверхневого струмів діелектрика**

Струм витoku  $i_e$  від клемми “+” джерела розгалужується з електрода 1 на об’ємний  $i_v$  струм до електрода 2 і поверхневий струм  $i_s$  до електрода 3. Струми  $i_v$ ,  $i_s$  сходяться в клемі “-” джерела, проходячи через датчик 4. Опори  $R_v$ ,  $R_s$  визначають шляхом почергового включення датчика 4 у вітці зі струмами  $i_v$  та  $i_s$ , залишаючи перемичку на колишньому місці датчика. Значення цих струмів настільки невеликі, що для вимірювання  $R_v$ ,  $R_s$  використовують підсилювач постійного струму з доволі високим коефіцієнтом підсилювання.

За результатами виміру (рис. 2.7) об’ємного  $R_v$  і поверхневого  $R_s$  опорів можна визначити, відповідно, питомий об’ємний  $\rho_v$  (Ом·м) і питомий поверхневий  $\rho_s$  (Ом) опори за такими формулами [5]:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{l}; \rho_s = R_s \frac{L}{g}, \quad (2.9)$$

де  $S = \pi \cdot d^2 / 4$  – площа контактної поверхні електрода 1;  
 $d$  – діаметр електрода 1;

$l$  – відстань між електродами 1 і 2, яку долають об'ємні заряди;  
 $L = \pi \cdot (D+d)/2$  – ефективний периметр електрода 1, з якого виходять поверхневі вільні заряди;  
 $D$  – внутрішній діаметр електрода 3;  
 $g = (D-d)/2$  – відстань між електродами 1 і 3, яку долають поверхневі заряди.

### ***Визначення концентрації вільних зарядів***

Питома електропровідність  $\gamma_v$  речовини пропорційна концентрації вільних зарядів  $n_0$  в об'ємі діелектрика, їх рухливості  $u_q$  і величині заряду  $q$  іона чи електрона [5]. Тому концентрацію вільних зарядів можна підрахувати, знаючи величину об'ємного питомого опору  $\rho_v$  діелектрика (2.9):

$$n_0 = \frac{1}{\rho_v u_q q}, \text{ м}^{-3}, \quad (2.10)$$

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

$u_q = v/E$  – середня рухливість вільних зарядів, м<sup>2</sup>/(В·с);

$v$  – середня швидкість переміщення вільних зарядів, м/с;

$E$  – напруженість електричного поля, В/м (1.3).

Рухливість іонів і електронів відповідна  $u_q \approx 10^{-13} \dots 10^{-16}$  м<sup>2</sup>/(В·с) і  $u_q \approx 3,5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/(В·с) [5]. В орієнтовних розрахунках  $n_0$  можна приймати  $u_q \approx 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/(В·с), враховуючи наявність в діелектриках обох видів носіїв струму.

### **2.3 Електричний пробій діелектриків**

Електричний пробій – це явище, коли діелектрик під впливом електричного поля втрачає свої електроізоляційні властивості. Напруженість поля  $E_{np}$ , при якій це відбувається, називається електричною міцністю [5]:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{l}, \text{ В/м}, \quad (2.11)$$

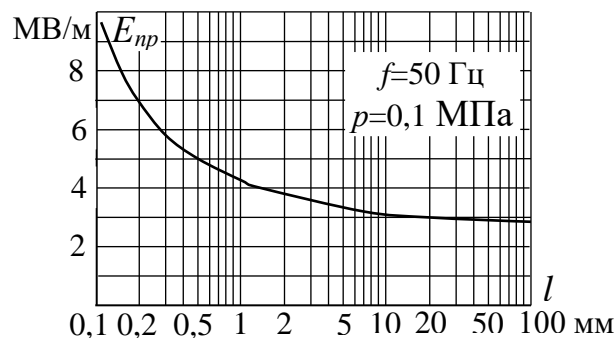
де  $U_{np}$  – електрична напруга, при якій відбувається електричний пробій, В;  
 $l$  – відстань між електродами (товщина діелектрика), м.

### **2.3.1 Електричний пробій газоподібних діелектриків**

Пробій газоподібного діелектрика обумовлений ударною і фотонною іонізацією, тобто суто електричними і дуже швидкими процесами. Тому при визначенні електричної міцності  $E_{np}$  (2.11) таких діелектриків використовують максимальні (амплітудні) значення напруги  $U_{np}$ .

Ударна іонізація відбувається внаслідок зіткнення з нейтральними молекулами вільних електронів як найбільш рухливих зарядів, які під впливом електричного поля отримали велику швидкість переміщення (близько 1000 км/с), а значить велику, кінетичну енергію, якої достатньо для іонізації молекул. Якщо процес іонізації розвивається лавиноподібно, то відбувається пробій діелектрика. Цей процес прискорюється, якщо внаслідок ударної іонізації в суміші газів додатково виникають фотони, енергії яких достатньо для іонізації інших молекул газу [5]. Пробій газу відбувається протягом  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с при  $l=1$  см.

***Вплив відстані між електродами на електричний пробій газу*** відображений на рисунку 2.8 на прикладі повітря [5].



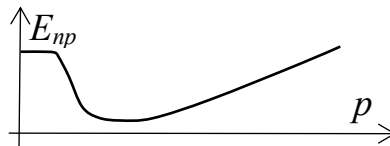
**Рисунок 2.8 – Залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами**

Зокрема, електрична міцність повітря зростає з 3 МВ/м при  $l=20$  мм до 7 МВ/м при  $l=0,2$  мм. Через цю залежність випробування

діелектриків на їх електричну міцність проводять при стандартній товщині діелектрика (чи відстані між електродами)  $l_{cm}=2,5$  мм.

### ***Вплив тиску газу на його електричний пробій***

При підвищенні тиску збільшується густина газу, зменшується довжина вільного пробігу електронів та їх здатність здійснювати ударну іонізацію. Тому в звичайних умовах електрична міцність газу  $E_{np}$  пропорційно залежить від його тиску  $p$  (права частина графіка на рис. 2.9).



**Рисунок 2.9 – Залежність електричної міцності газу від його тиску**

У дуже розрідженому газі знижується вірогідність зіткнення електронів з молекулами, і тому залежність  $E_{np}$  від  $p$  стає обернено пропорційною (ліва частина графіка на рис. 2.9). У стані майже вакууму ( $p \approx 0$ ) домінує вплив холодної емісії, тобто виривання електронів з електродів силами Кулона. В таких випадках значення  $E_{np}$  залежить лише від матеріалу електродів.

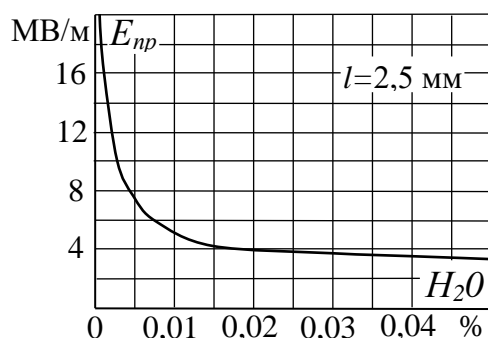
У неоднорідному електричному полі перед пробоем може виникати частковий пробій газу у вигляді корони поблизу електродів з малими розмірами, тобто в місцях підвищеної напруженості  $E$ . Особливо знижується електрична міцність газу, якщо електрод з малими розмірами підключений до позитивної клеми джерела постійного струму. Поблизу такого електрода виникає пучок повільних позитивних іонів, який зменшує ефективну відстань між електродами і знижує електричну міцність газу [5].

### **2.3.2 Електричний пробій рідких діелектриків**

Рідкі діелектрики (за звичай – це нафтове або трансформаторне масло) відрізняються від газоподібних більшою густиною, а значить меншою довжиною вільного пробігу електронів і більш високою електричною міцністю. Електричний пробій (втрата електроізоляційних властивостей) відбувається внаслідок іонізаційних теплових процесів.

Основними факторами негативного впливу на електричну міцність трансформаторного масла  $E_{np}$  (2.11) є температура та вода, яка потрапляє в масло з вологого повітря і знаходиться в ньому у стані емульсії.

**Вплив вологи на електричний пробій масла** стає особливо значним, якщо вміст води перевищує 0,01% (рис. 2.10)



**Рисунок 2.10 – Залежність електричної міцності трансформаторного масла від води**

Негативна дія вологи посилюється волокнистими домішками, які інтенсивно вбирають воду. Пробій рідких діелектриків пояснюється тим, що полярні домішки (емульсійна вода, волокна, тверді частинки) орієнтуються в електричному полі вздовж його силових ліній, утворюючи ланцюжки, в яких протікає струм, що викликає інтенсивне місцеве нагрівання [5].

**Вплив температури на електричний пробій масла** розглянутий на рисунку 2.11. Електрична міцність  $E_{np}$  трансформаторного масла починає суттєво знижуватись при температурі більше  $80^{\circ}\text{C}$ , коли починають закипати легкі фракції масла з виникненням багатьох газових бульбашок.

Наявність домішок води в експлуатаційному маслі суттєво знижує його електричну міцність  $E_{np}$ . Зростання  $E_{np}$  експлуатаційного масла в діапазоні температур  $0...60^{\circ}\text{C}$  пояснюється переходом домішок води із стану емульсії в стан молекулярного розчину. Підвищення  $E_{np}$  у процесі охолодження масла в діапазоні температур  $-10...-40^{\circ}\text{C}$  пояснюється збільшенням в'язкості масла та замерзанням краплинок води.

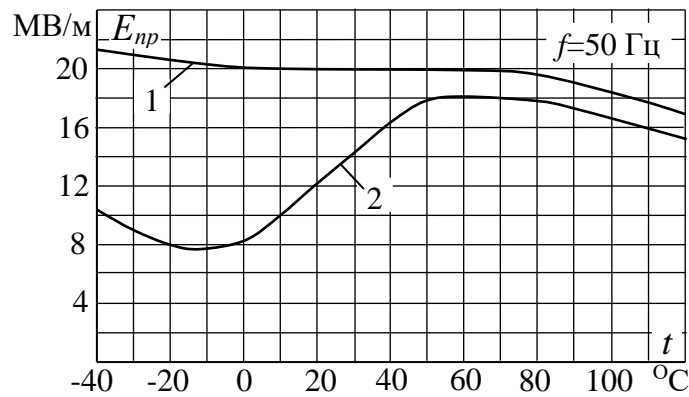


Рисунок 2.11 – Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури при  $l = 2,5$  мм (1 – висушене масло, 2 – експлуатаційне масло)

### **2.3.3 Електричний пробій твердих діелектриків**

Тверді діелектрики, на відміну від газоподібних та рідких діелектриків, не відновлюють свої електроізоляційні властивості після електричного пробію. Електричний пробій твердого діелектрика може мати такі чотири різновиди.

*Пробій однорідного діелектрика* – це суто електричний пробій унаслідок ударної іонізації при майже повній відсутності електропровідності і діелектричних втрат, що характерно для газоподібних і рідких діелектриків під впливом однорідного електричного поля. Процес пробію відображається дуже швидко – упродовж  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с. Електрична міцність деяких однорідних діелектриків в однорідному електричному полі може перевищувати електричну міцність трансформаторного масла в декілька разів [8]. Наприклад, електрична міцність скла, слюди і просоченого рідким діелектриком паперу сягає  $100 \dots 300$  МВ/м, тобто на порядок більше, ніж у трансформаторного масла [5...8].

*Неоднорідність твердих діелектриків* спричиняється часто газовими включеннями в них та пористістю. До неоднорідних твердих діелектриків відносяться не просочені рідким діелектриком папір та дерево, пориста кераміка. Їх електрична міцність дещо перевищує електричну міцність повітря. Якщо ж щільність цих матеріалів підвищена



або якщо газові включення витіснені рідким діелектриком, то їх електрична міцність зростає.

**Тепловий пробій** обумовлений нагріванням діелектрика через його прямий контакт з провідником електричного струму (1.10), через наявність стороннього джерела тепла, а також через електричний струм та діелектричні втрати безпосередньо в діелектрику, особливо при великих значеннях напруженості  $E$  електричного поля, частоти поля  $\omega$ , діелектричної проникності  $\varepsilon_r$  і тангенса кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$  діелектрика (2.3). Нагрівання діелектрика в свою чергу суттєво збільшує  $\varepsilon_r$  і  $\operatorname{tg} \delta$ , що сприяє подальшому нагріванню діелектрика. Якщо в окремих зонах діелектрика тепловиділення перевищує теплопередачу, то процес розігрівання цих зон до критичних для даного діелектрика температур (близько  $100 \dots 150^\circ \text{C}$ , інколи  $200 \dots 300^\circ \text{C}$ ) розвивається лавиноподібно.

**Електрохімічний пробій** виникає внаслідок електролітичних процесів у діелектрику, які зумовлюють його поступове хімічне руйнування, незворотне погіршення електроізоляційних властивостей та зниження електричної міцності. Це явище називають старінням діелектрика. Відбувається воно повільно, супроводжується утворенням невеликої кількості хімічно активних речовин або напівпровідних сполук. Старіння діелектрика прискорюються під впливом підвищеної температури та високої вологості повітря.

## **2.4 Теплові властивості діелектриків**

Серед теплових властивостей діелектриків найбільш важливими є теплостійкість, нагрівостійкість та теплопровідність.

### **2.4.1 Теплостійкість діелектриків**

**Теплостійкість** – це здатність електроізоляційних матеріалів витримувати короточасне сильне нагрівання без втрати чи погіршення його властивостей.

## **2.4.2 Нагрівостійкість діелектриків**

**Нагрівостійкість** – це здатність електроізоляційних матеріалів виконувати свої основні функції без пошкоджень і недопустимого погіршення властивостей під впливом високої температури на протязі певного часу (як правило 20000 год). Час витримки під дією високої температури обмежується тепловим старінням діелектрика. Можливість підвищення робочої температури ізоляції надзвичайно важлива. Вона дозволяє отримати більшу потужність обладнання при збереженні габаритів або зменшити габарити та вартість виробів при збереженні потужності. Зменшення габаритів особливо важливо для пересувних видів обладнання. Електроізоляційні матеріали, які використовуються в електричних машинах, трансформаторах та апаратах, поділяють на сім основних класів нагрівостійкості в залежності від допустимої робочої температури [5...8]:

**Клас Y (до 90°C)** – волокнисті матеріали на основі целюлози, бавовни, шовку та поліамідів, які не просочені і не занурені в рідкий електроізоляційний матеріал (пряжа, тканини, стрічки, папір, картон, деревина), полівінілхлорид, гума з натурального каучуку, поліетилен, полістирол.

**Клас A (до 105°C)** – ті ж самі волокнисті матеріали, але просочені масляними, масляно-смоляними та іншими лаками або занурені в рідкий діелектрик, а також поліамідна плівка, ізоляція емальованих провідників полівінілацетатними лаками.

**Клас E (до 120°C)** – пластмаси з органічним наповнювачем та термореактивним сполуками (гетинакс, текстоліт), епоксидні і поліуретанові смоли та компаунди, полікарбонатні плівки, ізоляція емальованих провідників на поліуретанових і епоксидних лаках.

**Клас B (до 130°C)** – матеріали на основі слюди, азбесту, скловолокна з органічними сполуками і просоченими матеріалами та на органічних підкладках (міканіти, склотекстоліти, склолакотканини), поліуретанові лаки, епоксидні компаунди з неорганічним наповнювачем.

**Клас F (до 155°C)** – міканіти без підкладок або з неорганічними підкладками із застосуванням органічних сполук підвищеної теплостійкості, епоксидних і кремнійорганічних смол.

**Клас Н (до 180°C)** – матеріали на основі слюди, азбесту, склотовлокна разом з кремнійорганічними смолами підвищеної теплостійкості, кремнійорганічні еластополімери, фторопласт-4.

**Клас С (до 200°C)** – неорганічні матеріали без органічних сполук і просочених матеріалів (слюда, керамічні матеріали, скло, кварц, азбест, теплостійкі міканіти).

Для матеріалів, які мають працювати при більш високих температурах, уведено класи 220 і 250 (робочі температури 220 і 250°C). До них належать деякі види слюди, керамічні матеріали, скло. Для ще більш високих робочих температур допускається введення класів 275, 300 ... (через кожні 25°C).

Матеріали відносять до певного класу нагрівостійкості на основі досвіду експлуатації або випробувань. Аналіз даних багаторічної експлуатації електричних машин виявив, що термін служби їх ізоляції, а отже і машин, різко скорочується при перевищенні температури обмотки максимально допустимого значення (відповідного класу теплостійкості ізоляції). Так, для ізоляції класів А і В при перевищенні температури приблизно на кожні 10°C термін служби зменшується вдвічі.

### **2.4.3 Теплопровідність діелектриків**

Важливість теплопровідності діелектриків обумовлена необхідністю постійної передачі через діелектрик теплової енергії від працюючого електрообладнання в оточуюче середовище. Основними джерелами теплової енергії є електричні втрати в провідниках з електричним струмом (1.10), діелектричні втрати (2.3) і магнітні втрати. Діелектрики мають низьку молекулярну чи фононну теплопровідність через надзвичайно малу кількість вільних електронів, які відіграють важливу роль у процесі теплопередачі в провідниках. Серед поширених у використанні діелектриків малу питому теплопровідність  $\gamma_m$  мають: повітря ( $\gamma_m=0,05$  Вт/м·К), папір ( $\gamma_m=0,1$  Вт/м·К), лакотканина ( $\gamma_m=0,13$  Вт/м·К). Відносно велику теплопровідність мають гетинакс ( $\gamma_m=0,35$  Вт/м·К), фарфор ( $\gamma_m=1,6$  Вт/м·К), кристалічний кварц ( $\gamma_m=12,5$  Вт/м·К), оксид магнію ( $\gamma_m=36$  Вт/м·К), оксид берилію ( $\gamma_m=218$  Вт/м·К).

## 2.5 Деякі діелектричні матеріали

### 2.5.1 Газоподібні діелектричні матеріали

**Повітря** в багатьох випадках залишається основним діелектриком, незважаючи на ряд його недоліків. Маються на увазі перш за все його низькі значення діелектричної проникності  $\epsilon_r$ , електричної міцності  $E_{np}$  і теплопровідності  $\gamma_m$  (рис. 2.8, 2.9 і 2.12).

**Елегаз** – це гексафторид сірки (шестифториста сірка)  $SF_6$ . Назва цього діелектрика походить від словосполучення “електричний газ” через його високі електроізоляційні властивості. Відносно повітря електрична міцність елегазу в 2,5 рази, а густина – в 6,1 рази вище. Елегаз прозорий, не токсичний та хімічно стійкий. Особливо великі переваги перед повітрям має елегаз при підвищеному тиску (рис. 2.12) При підвищеній температурі, зокрема, в зоні електричної дуги під час розмикання провідника з електричним струмом молекули елегазу розкладаються на фтор і сірку, забираючи значну частину електричної енергії і сприяючи гасінню дуги. Забрана енергія потім поступово повертається внаслідок поновлення елегазу. Елегаз успішно використовується в електричних вимикачах підвищеної напруги та потужності, а також у конденсаторах та електричних кабелях.

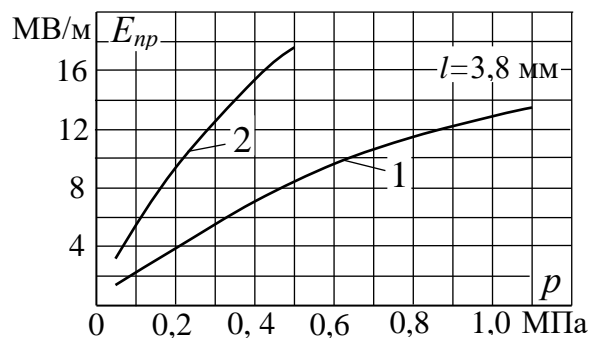


Рисунок 2.12 – Залежність електричної міцності повітря (1) та елегазу (2) від тиску

Важливими перевагами **водню** є велика питома теплопровідність і теплоємність, а також дуже мала густина при звичайному тиску. Ці властивості дозволяють ефективно використовувати водень для охолодження рухомих частин дуже потужних електричних машин, зокрема,

синхронних турбогенераторів та компенсаторів. Ефективність використання водню проявляється в суттєвому покращенні охолодження машин, зниженні втрат потужності машини на тертя та вентиляцію, в підвищенні потужності машини та її коефіцієнта корисної дії, покращенні роботи електричних щіток, уповільненні старіння електричної ізоляції. Водень завдяки малим розмірам атомів легко розчиняється в металах, особливо в літій  $Li$ , що дозволяє зручно і безпечно зберігати і транспортувати водень. Наприклад, кілограм гідриду літію  $LiH$  може вмістити  $2,8 \text{ м}^3$  водню. Перелічені переваги компенсують головний недолік водню – його високу вибухонебезпечність у середовищі, де є кисень. Цей недолік змушує використовувати ряд технічних засобів попередження можливого вибуху водню як електроізоляційного та охолоджуючого газу.

**Азот** ( $N_2$ ) отримують з повітря скраплення з подальшою ректифікацією. Зміст чистого азоту в газоподібному стані коливається в межах 99-99,9%, в рідкому - 96%.

Основні параметри азоту: щільність, теплопровідність, електрична міцність, коефіцієнт діелектричної проникності і питомий опір такого ж порядку, як і у повітря.

При нормальній температурі ( $20^\circ \text{C}$ ) азот хімічно інертний і не реагує з металами, за винятком літію. При нагріванні з'єднується з магнієм і кальцієм, а при дуже високій температурі - з киснем і воднем.

У чистому вигляді азот використовується як ізолююча середовище в високовольтних конденсаторах і електровакуумної техніці, а також як захисне середовище (мікроелектроніка, трансформатори).

Найбільш широке застосування азот як ізолююча середовище перебувають в суміші з елєгазом.

До **інертних газів** відносяться гелій  $He$ , неон  $Ne$ , аргон  $Ar$ , криптон  $Kr$ , ксенон  $Xe$  і радон  $Rn$ . Ці гази хімічно дуже інертні, мають низьку густину і легко іонізуються через малу електричну міцність  $E_{np}$ .

Інертні гази мають дуже низький потенціал іонізації, тому їх електрична міцність низька (наприклад, у гелію в 17 разів нижче, ніж у повітря). Інертні гази застосовуються в техніці слабких струмів в газорозрядних приладах. Кожен з інертних газів мають свої особливі і

навіть унікальні властивості, які дозволяють використовувати їх у досить незвичайних умовах.

**Гелій** має найменшу температуру зрідження, що дозволяє використовувати його як ефективний низькотемпературний охолоджувач, у тому числі для створення умов надпровідності електричних провідників. Зокрема, температура зрідження основного ізотопу гелію складає 4,216 К при атмосферному тиску, в'язкість рідкого гелію практично нульова, а теплопровідність – навпаки, дуже велика.

**Неон** має відносно низьку температуру зрідження (27,1 К) при значно більшій теплоті пароутворення у порівнянні з гелієм, і тому інколи використовується як низькотемпературний охолоджувач. Неоном заповнюють газорозрядні та сигнальні лампи яскраво-червоного кольору, які використовуються в рекламі, радіотехнічній апаратурі, а також на маяках та аеродромах завдяки слабому розсіюванню в тумані променів червоного кольору. Суміш неону з гелієм використовують як робоче середовище в газових лазерах. Широкому використанню неону заважає його висока вартість, яка в декілька сотень разів вище вартості гелію.

**Аргон** зріджується при температурі 87,1 К. Його отримують як побічний продукт при розділенні повітря на кисень і азот у промислових масштабах, і тому має відносно низьку вартість. Аргон використовується в газорозрядних трубках фіолетово-голубого кольору, аргонових лазерах, для наповнення звичайних освітлювальних ламп розжарювання, для створення захисного (без кисню) середовища при зварюванні деяких металів, наприклад, алюмінію.

**Криптон** зріджується при температурі 119,8 К. Його отримують з повітря у вигляді криптон-ксенонової суміші і використовують для наповнення газорозрядних трубок зеленуватого кольору та рентгенівських трубок, а також для виготовлення надпотужних ультрафіолетових газових лазерів.

**Ксенон** зріджується при температурі 112 К, що дуже близько до температури зрідження криптону. Його отримують з криптон-ксенонової суміші і використовують для виготовлення потужних газорозрядних та імпульсних джерел світла, як робоче середовище лазерів, а також як робоче тіла в іонних реактивних двигунах.

*Радон* – це продукт радіоактивного розпаду багатьох радіоактивних речовин, який не має стабільних ізотопів, не виробляється і майже не використовується. Цей газ здатний накопичуватись у погано провітрюваних приміщеннях через наявність у будівельних матеріалах деякої кількості радіоактивних речовин.

### **2.5.2 Рідкі діелектричні матеріали**

Рідкі діелектрики органічно поєднують у собі дві дуже важливі функції – забезпечення високої електричної міцності ізоляції та відведення теплоти від обмоток та магнітопроводів діючого електричного обладнання. Виконання першої функції ґрунтується на значно великій електричній міцності рідких діелектриків у порівнянні з газоподібними діелектриками та на здатності рідких діелектриків витіснити з волокнистих діелектриків газові порожнини, тобто просочувати волокнисті діелектрики. Виконання другої функції ґрунтується на значно більшій теплоємності і теплопровідності рідких діелектриків у порівнянні з газоподібними діелектриками та на можливості фізичного переміщення і переносу теплоти, тобто на конвекції, на що не здатні тверді діелектрики. Окрім зазначених функцій рідкі діелектрики здатні ефективно гасити енергію електричної дуги в електричних вимикачах. Ця енергія накопичується в магнітному полі навколо провідників електричного струму і потім майже повністю виділяється в місці розриву електричного струму відповідно до закону збереження енергії.

Рідкі діелектрики, які використовуються в електрообладнанні, можна поділяти на три основні групи – нафтові електроізоляційні масла, рослинні масла та синтетичні рідинні діелектрики.

#### ***Нафтові електроізоляційні масла***

Основну частину нафтових електроізоляційних масел складають вуглеводневі складові. Чітка хімічна формула масел не відома. Нафтові масла отримують методом ретельного чищення залишкових фракцій нафти відповідного рівня в'язкості. Нафтові електроізоляційні масла є горючими рідинами і становлять велику небезпеку. Пожежна небезпека оцінюється по температурі спалаху парів рідкого діелектрика в суміші з

повітрям. Ця температура повинна бути не нижче 135...140<sup>0</sup>С. До них відносять *трансформаторне, конденсаторне та кабельне масло*.

**Трансформаторне масло** – це суміш різноманітних вуглеводнів, отриманих з нафти шляхом ступінчастої перегонки з виділенням потрібних фракцій масла і подальшого ретельного їх очищення від домішок. Найбільш важливою властивістю трансформаторного масла є його електрична міцність, яка залежна від вмісту вологи (рис. 2.10), газових включень і температури (рис. 2.11). Електричну міцність визначають експериментально при використанні металевих дискових електродів діаметром 25 мм із закругленими краями при відстані між цими електродами  $l = 2,5$  мм. У таблиці 2.1 наведені норми мінімально допустимих значень електричної міцності двох типів масла – “свіжого” (чистого і сухого) масла, підготовленого до заливки в трансформатор чи інший апарат, і “експлуатаційного” [5].

Таблиця 2.1 – Норми електричної міцності трансформаторного масла

Номінальна напруга апарата, наповненого маслом, кВ	Електрична міцність масла $E_{np}$ (не менше), МВ/м	
	для “свіжого”	для “експлуатаційного”
До 15 включно	10	8
Від 15 до 35 включно	12	10
Від 60 до 220 включно	16	14
Від 330 і вище	20	18

**Конденсаторне масло** використовується для просочення паперової електричної ізоляції конденсаторів. Просочений маслом папір має більшу діелектричну проникність  $\epsilon_r$  і більшу електричну міцність  $E_{np}$ , що дозволяє знизити габарити, масу і вартість конденсаторів при заданих робочій напрузі, частоті і ємності. Конденсаторне масло схоже на трансформаторне за технологією виготовлення, але потребує більш ретельної очистки. Електрична міцність просушеного конденсаторного масла має бути не менше 20 МВ/м.

**Кабельне масло** використовується для просочення паперової електричної ізоляції електричних силових кабелів. Кабельне масло буває



декількох типів в залежності від величини робочої напруги, які відрізняються в'язкістю. У високовольтних кабелях з напругою 110...500 кВ використовують особливо ретельно очищене і дегазоване масло створюючи додатковий тиск  $\approx 0,3...0,4$  МПа під час експлуатації кабелю.

**Рослинні електроізоляційні масла** – в'язкі рідини, які отримують з насіння різних рослин. Серед цих масел найбільш важливими є висихаючі масла. Висихання відбувається внаслідок хімічних процесів на основі окисної полімеризації. При нагріванні плівка висушеного рослинного масла не розчиняється. Прикладами рослинного електроізоляційного масла є конопляне, тунгове і касторове масло.

#### **Синтетичні рідкі електроізоляційні діелектрики**

Серед синтетичних масел, які за деякими показниками краще нафтових, можна відзначити *хлоровані вуглеводні, кремнійорганічні і фторорганічні рідини* [5...8].

**Хлорований вуглеводень** – це хлорований продукт дифенілу  $C_{12}H_{10}$  з різним ступенем хлорування. Частіше використовують хлорований вуглеводень  $C_{12}H_5Cl_5$ , який називають соволом. У порівнянні з нафтовими маслами совол має кращі властивості:  $\epsilon_r \approx 5$ ;  $\text{tg} \delta \approx 0,005...0,01$ ;  $\rho \approx 10^{11}$  Ом·м;  $E_{np} \approx 15$  МВ/м. Недоліком соволу є токсичність газових виділень, які виникають під впливом електричної дуги. В даний час використання хлорованих вуглеводнів типу соволу і совтолу заборонено.

**Кремнійорганічні рідини** – це речовини, молекули яких складаються з атомів кремнію і кисню та мають лінійну будову. У порівнянні з нафтовими маслами кремнійорганічні рідини мають кращі властивості, особливо щодо теплостійкості (до  $250^\circ\text{C}$ ):  $\epsilon_r = 2,4...2,8$ ;  $\text{tg} \delta = 0,0001...0,0003$ ;  $\rho = 10^{11}...10^{12}$  Ом·м;  $E_{np} \approx 14...18$  МВ/м). Ці рідини мають високу вартість і тому використовуються лише при підвищених робочих температурах.

**Фторорганічні рідини** – це речовини, молекули яких складаються з атомів вуглецю і фтору, мають хімічну властивість  $C_mF_n$  та лінійну будову. Ці речовини можуть бути в рідкому, газоподібному чи твердому стані. Головною перевагою фторорганічних рідин є висока теплостійкість (до  $300^\circ\text{C}$ ), негорючість і здатність до інтенсивного

відведення тепла. Інші характеристики фторорганічних рідин:  $\epsilon_r = 2,2 \dots 2,5$ ;  $\operatorname{tg} \delta = 0,0001 \dots 0,0002$ ;  $\rho = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $E_{np} \approx 12 \dots 19 \text{ МВ/м}$ .

### **2.5.3 Тверді діелектричні матеріали**

Загальною відмінністю більшості з твердих діелектриків від газоподібних і рідких діелектриків є здатність витримувати механічні навантаження окрім основних електроізоляційних функцій.

#### ***Смоли і полімери***

Смоли є основним початковим матеріалом або важливим компонентом для виготовлення багатьох твердих діелектриків. При звичайній температурі смоли – це аморфні скловидні речовини, які при нагріванні стають пластичними і потім рідкими з клейкими властивостями. За своєю структурою смоли бувають природними і синтетичними. Найбільше практичне значення мають синтетичні смоли, які отримані в результаті полімеризації або поліконденсації. Тому в деяких випадках синтетичні смоли називають полімерами. Полімери можуть створюватися з мономерів шляхом полімеризації або поліконденсації. Процес полімеризації відбувається за участю однієї речовини (мономера) під дією нагріву, високого тиску, ультрафіолетових променів, каталізаторів без виділення побічних продуктів. Внаслідок полімеризації утворюються лінійні полімери, молекули яких мають вигляд ланцюжків або ниток. Лінійні полімери гнучкі та еластичні, більшість з них при помірному підвищенні температури розм'якшуються та плавляться, і тому часто називаються термопластичними. Процес поліконденсації відбувається за участю не менше двох різних хімічних речовин з виділенням побічних продуктів (води, двоокису вуглецю, аміаку). Внаслідок поліконденсації утворюються просторові полімери чи смоли. Просторові полімери та смоли зазвичай тверді, крихкі; важко піддаються плавленню і розчиненню, і тому часто називаються терморективними.

Смоли й полімери можна розділити на три основні групи – *природні смоли, термопластичні і терморективні синтетичні смоли і полімери.*

**Природні смоли** одержують майже в готовому вигляді лише при нескладних операціях очищення і переплавки природних речовин.

**Шелак** – є продуктом життєдіяльності деяких комах, що виділяється на деревах комахами у тропіках. При нагріванні до  $60^{\circ}\text{C}$  стає гнучким, при  $> 60^{\circ}\text{C}$  розплавляється, а при тривалому нагріванні запікається і отримує термореактивні властивості. Електроізоляційні властивості:  $\rho_v = 10^{13} \dots 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r \approx 3,5$ ,  $\text{tg}\delta \approx 0,01$ ,  $E_{np} = 20 \dots 30 \text{ МВ/м}$ .

**Каніфоль** – крихка смола, складається в основному з органічних кислот, розчиняється в рідких вуглеводнях, розм'якшується при температурі  $+50 \dots 70^{\circ}\text{C}$ . Каніфоль отримують з природної смоли сосни. Розчин каніфолі в нафтовому маслі, використовується при виготовленні масляних лаків і кабельних компаундів. Електроізоляційні властивості:  $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r \approx 3$ ,  $\text{tg}\delta \approx 0,03$ ,  $E_{np} = 10 \dots 15 \text{ МВ/м}$ .

**Копали** – тугоплавкі, тверді і важкорозчинні смоли. Їх добувають як викопні продукти розкладу дерев-смолоносіїв, наприклад, у вигляді бурштину. Копали використовуються як домішки до масляних лаків. Електроізоляційні властивості копалів:  $\rho_v = 10^{15} \dots 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r \approx 2,8$ ,  $\text{tg}\delta \approx 0,001$ .

**До термопластичних полімерів** с лінійною будовою молекул належать *поліетилен*, *полівінілхлорид*, *фторопласт-4*, *полістирол*, *поліімідні смоли*.

**Поліетилен** - продукт полімеризації газоподібного етилену  $\text{C}_2\text{H}_4$ , безбарвний, прозорий, твердий, жирний на дотик, неполярний, стійкий до дії кислот та випромінювання; у полум'ї оплавляється і горить, має доволі високі електроізоляційні властивості:  $\rho_v = 10^{13} \dots 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r = 2,3 \dots 2,4$ ;  $\text{tg}\delta = 0,0001 \dots 0,0005$ ;  $E_{np} = 15 \dots 20 \text{ МВ/м}$ . Із поліетилену виготовляють плівки, шланги, трубки для ізоляції кабелів, каркаси котушок. Зараз поліетилен широко використовують також для ізоляції проводів та високовольтних кабелів.

**Полівінілхлорид (ПВХ)** – продукт полімеризації газоподібного вінілхлориду  $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$  у присутності перекису водню. ПВХ має жовтуватий колір, твердий, крихкий, горить тільки у полум'ї, стійкий проти дії води, кислот, спирту, гасу, бензину, озону, опромінення. ПВХ є полярним діелектриком і тому має знижені діелектричні властивості порівняно з неполярними полімерами:  $\rho_v = 10^{13} \dots 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\varepsilon_r = 3,2 \dots 3,6$ ;

$\operatorname{tg}\delta = 0,03 \dots 0,08$ ;  $E_{np} = 15 \dots 20$  МВ/м. ПВХ використовуються для ізоляції проводів та кабелів низької напруги, трубок для допоміжної ізоляції, липких ізоляційних стрічок, плівок.

**Політетрафторетилен (фторопласт-4)** – продукт полімеризації газоподібного тетрафторетилену  $C_2F_4$ . Фторопласт-4 – фторорганічний полімер, білий або сіруватий на вигляд матеріал, порівняно м'який, неполярний. За електроізоляційними властивостями фторопласт-4 є одним з найкращих діелектриків:  $\rho_v = 10^{15} \dots 10^{16}$  Ом·м;  $\epsilon_r = 1,9 \dots 2,1$ ;  $\operatorname{tg}\delta = 0,0001 \dots 0,0003$ ;  $E_{np} = 20 \dots 30$  МВ/м. Фторопласт-4 має надзвичайно високу теплостійкість ( $+250^\circ\text{C}$ ), зберігає гнучкість при температурі нижче мінус  $80^\circ\text{C}$ , надзвичайно хімічно стійкий, негорючий, не змочується рідинами, має незначну радіаційну стійкість. Фторопласт-4 застосовується у відповідальних випадках при одночасній дії на ізоляцію високих або низьких температур та хімічно активних середовищ. **Полістирол** - продукт полімеризації рідкого стиrolу  $C_8H_8$ . Електроізоляційні властивості полістиролу приблизно такі самі як у поліетилену. Полістирол широко використовується в техніці високих і надвисоких частот. Його недоліками є мала пластичність при нормальних температурах, значна крихкість при низьких температурах та схильність до виникнення поверхневих тріщин.

**Поліімідні смоли** мають у собі імідне угруповання атомів ... –CO–N–CO–... Вони є дуже якісними діелектричними матеріалами. Поліімідні смоли найбільш теплостійкі серед полімерів (не менш  $+220^\circ\text{C}$ ), мають значну морозостійкість (до мінус  $269^\circ\text{C}$ ), стійкі до органічних розчинників, масел та розбавлених кислот, а також до дії іонізуючого випромінювання. Електроізоляційні властивості поліімідів:  $\rho_v = 10^{15} \dots 10^{16}$  Ом·м;  $\epsilon_r = 3,5$ ;  $\operatorname{tg}\delta = 0,0006 \dots 0,0016$ ;  $E_{np} = 160 \dots 200$  МВ/м. З поліімідів виробляють плівки, які використовують у конденсаторах, теплостійких кабельних виробках, ізоляції електричних машин, а також для виготовлення деяких пластмас і лаків для покриття провідників та просочення невеликих катушок.

До **термореактивних синтетичних смол і полімерів** відносяться *фенолформальдегідні смоли, епоксидні смоли у твердому стані, кремнійорганічні смоли.*

**Фенолформальдегідні (бакелітові) смоли** є продуктами поліконденсації водяних розчинів фенолу  $C_6H_5OH$  і формальдегіду  $H_2CO$  з каталізатором. У разі надлишку формальдегіду при використанні лужного каталізатора (аміаку) одержують термореактивну смолу (бакеліт) з непоганими діелектричними характеристиками:  $\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12}$  Ом·м;  $\epsilon_r = 5 \dots 6,5$ ;  $tg\delta = 0,01 \dots 0,1$ ;  $E_{np} = 10 \dots 20$  МВ/м. Бакеліт стійкий до дії води, спирту, ацетону, бензину, масл, сірчаної та соляної кислот. Бакелітову смолу використовують для виготовлення гетинаксу, текстоліту, паперово-бакелітових циліндрів, трубок, ізоляційних втулок. На основі бакеліту виготовляють порошки для гарячого пресування масових виробів – вимикачів, розеток, кнопок, штепсельних вилок.

**Епоксидна смола** в звичайному стані є термопластичним матеріалом. Але після додавання отверджувача епоксидна смола протягом декількох годин стає термореактивною внаслідок полімеризації. Епоксидні смоли використовуються при виготовленні клеїв, лаків, компаундів. Більшість епоксидних смол у процесі їх полімеризації токсично впливають на організм людини.

**Кремнійорганічні смоли** мають силоксанові групи циклічно повторюваних атомів кремнію та кисню. Вони можуть бути як термопластичними з лінійною будовою молекул, так і термореактивними з просторовою будовою молекул. Кремнійорганічні смоли використовуються при виготовленні лаків, компаундів, пластмас. Їх високі електроізоляційні властивості зберігаються навіть при підвищених температурах. Недоліком цих смол є відносно висока їх ціна, а також низька механічна міцність.

**Електроізоляційні лаки та компаунди** – це багатокомпонентні матеріали, які в стадії зберігання та виготовлення ізоляції знаходяться в рідкому стані, а на заключній стадії – твердіють [5...8]. Основними їх компонентами є смоли, полімери, бітуми та рослинні масла, які здатні висихати. Лаки поділяються на *просочувальні, покривні і клеючі*.

**Просочувальними лаками** заповнюють пористу ізоляцію для підвищення електричної міцності, теплостійкості, діелектричної провідності.

**Покривними лаками** утворюють на поверхні діелектриків гладку і вологостійку плівку. Деякі покривні лаки (так звані емаль-лаки) наносяться безпосередньо на поверхню електропровідного металу, утворюючи електроізоляційний шар.

**Клеючими лаками** склеюють між собою листи твердих діелектричних матеріалів, наприклад, при виготовленні міканітів.

**Компаунди** – це електроізоляційні просочувальні і заливні речовини, які складаються із суміші різних смол, бітумів і масел. Для поліпшення механічних властивостей до них додають наповнювачі, пластифікатори і отверджувачі. На момент використання компаунди перебувають у рідкому стані. Потім компаунди твердіють у результаті охолодження або хімічних процесів. Компаунди використовують для просочення обмоток електричних машин і трансформаторів, для заливання радіоприладів, для герметизації електротехнічних вузлів.

**Волокнисті матеріали** складаються з частинок витягнутої форми. Повітряні порожнечі між цими частинками суттєво погіршують діелектричні властивості волокнистих матеріалів. Тому їх зазвичай просочують рідкими діелектриками, маслами, лаками чи смолами. До волокнистих матеріалів відносяться *дерево, папір, фібра, тканина* та інші волокнисті матеріали природного, штучного або синтетичного походження.

**Дерево** має непогані механічні властивості. Діелектричні властивості дерева покращуються шляхом висушування та подальшого просочення його парафіном, конопляним маслом, різноманітними смолами.

**Електротехнічний папір і картон** – це листові або рулонні матеріали, які виготовляють в основному із деревної целюлози. Дерев'яну тирсу варять у розчині їдкого натрію NaOH для видалення шкідливих домішок, промивають, виготовляють папір, висушують і прокатують валками, намагаючись мінімізувати об'єм повітряних проміжок. Картон відрізняється від паперу лише товщиною (до 3 мм).

**Кабельний папір** застосовується для ізоляції (обмотування) провідників силових високовольтних кабелів напругою до 500кВ. Його просочують масляно-каніфольним компаундом.

**Конденсаторний папір** є найбільш тонким і високоякісним волокнистим електроізоляційним матеріалом. Його просочують нафтовим конденсаторним маслом для підвищення  $\varepsilon_r$  і  $E_{np}$  та зменшення  $\text{tg } \delta$ .

**Текстильні електроізоляційні матеріали** – це бавовняні, шовкові, синтетичні тканини або склотканини, які просочують електроізоляційними маслами та лаками для покращення їх електроізоляційних властивостей. Якщо для просочення використовуються лаки, то ці матеріали називають лакотканинами або лакованими стрічками.

**Пластмаси (пластики)** є багатокомпонентними матеріалами, які складаються зі *сполучного, наповнювача* та деяких *додаткових компонентів*.

**Сполучне** – це органічна високомолекулярна сполука (органічна смола або полімер), яка має клеючу здатність, а також здатність до пластичної деформації під дією зовнішнього тиску та нагріву.

**Наповнювач** – речовина, яка зчіплюється зі сполучним під дією тиску і підвищеної температури та формується. Наповнювач суттєво здешевлює пластмасу і одночасно може поліпшувати її механічні властивості, особливо, як наповнювач використовується листовий волокнистий матеріал, наприклад, папір (гетинакс) або тканина (текстоліт чи склотекстоліт).

**Додатковими компонентами** також можуть бути пластифікатори, які збільшують пластичність та зменшують крихкість матеріалів, отверджувачі, мастильні речовини, барвники.

**Гуми** – вулканізовані багатокомпонентні системи на основі натурального чи синтетичного каучуку. Гуми завдяки високій своїй еластичності відносяться до еластомірів. При виготовленні гуми до її складу вводять також сірку або тіурам, прискорювачі процесу вулканізації, наповнювачі (крейда, тальк, каолін) для поліпшення механічних властивостей та зниження вартості гуми, пом'якшувачі (стеарин, парафін) для поліпшення технологічних властивостей [6]. Залежні від кількості

сірки буває м'яка гума (1...3% сірки) і тверда гума, яка називається ебонітом (30...35% сірки). Чиста сірка здатна вступати в хімічну реакцію з міддю. Тому в разі необхідності ізоляції мідних провідників використовують гуму з додаванням тіураму замість сірки. Гума широко використовується у виробленні провідників і кабелів, діелектричних рукавичок і калош. Суттєвим недоліком гуми є її низька стійкість до дії кисню, світла, тепла та електричних розрядів.

**Керамічні діелектрики** отримують шляхом спікання дуже роздроблених і ретельно перемішаних мінералів і окислів металів. Вони мають більш високу стійкість до електричного і теплового старіння і до тривалого механічного навантаження у порівнянні з органічними діелектриками.

Серед керамічних діелектриків найбільш відомим є **електротехнічний фарфор**, який використовується при низькій частоті. До його складу входять ~50% каоліну, ~25% кварцу  $SiO_2$  і ~25% польового шпату. Електротехнічний фарфор має такі діелектричні характеристики:  $\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12}$  Ом·м;  $\epsilon_r = 5 \dots 7$ ;  $tg\delta = 0,025 \dots 0,035$ ;  $E_{np} = 25 \dots 30$  МВ/м. Для роботи при низькій частоті призначена також низькочастотна конденсаторна кераміка, яку отримують шляхом синтезу чистих окислів стронцію, вісмуту, титану, олова, окислів цинку і марганцю.

До **високочастотної кераміки** відносяться *стеатитова* (на основі кліноенстатита  $MgO \cdot SiO_2$ ), *форстеритова* (на основі форстериту  $2MgO \cdot SiO_2$ ), *шпинельно-форстеритова* (на основі шпинелі  $MgO \cdot Al_2O_3$  і форстериту  $2MgO \cdot SiO_2$ ), *вилемитова* (на основі вилемиту  $2ZnO \cdot SiO_2$ ), *глиноземиста* (на основі оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ ) і *корундова* відповідно [6]. Найбільшою теплостійкістю володіє корундова кераміка (високі значення електричних характеристик зберігаються при температурі до  $400^\circ C$ , а механічні характеристики зберігаються при температурі до  $1600^\circ C$ ). Корундова кераміка має такі діелектричні характеристики при частоті 1 МГц:  $\rho_v = 10^{14} \dots 10^{15}$  Ом·м;  $\epsilon_r = 9,3 \dots 10,5$ ;  $tg\delta = 0,0001 \dots 0,0005$ ;  $E_{np} = 28 \dots 50$  МВ/м.



### **Слюдяні матеріали**

Слюда як основа слюдяних матеріалів – це природний діелектрик, який має дуже високі діелектричні властивості. Слюда зустрічається в природі у вигляді кристалів різних відтінків. Їх характерною особливістю є властивість легко розшаровуватися на дуже тонкі пластинки. Слюда зустрічається в двох видах – *мусковіт* і *флогопіт*. Їх хімічні формули приблизно такі: *мусковіт* –  $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ ; *флогопіт* –  $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ . До складу слюди можуть також входити з'єднання заліза, натрію і кальцію.

За діелектричними властивостями мусковіт краще:  $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{16}$  Ом·м;  $\epsilon_r = 6,8 \dots 7,2$ ;  $\text{tg} \delta = 0,0003$  при частоті 1 МГц і 0,015 при частоті 50 Гц;  $E_{np} \approx 200$  МВ/м. Діелектричні властивості флогопіту:  $\rho_v = 10^{12}$  Ом·м;  $\epsilon_r = 6 \dots 6,2$ ;  $\text{tg} \delta = 0,0015$  при частоті 1 МГц і 0,05 при частоті 50 Гц;  $E_{np} \approx 100$  МВ/м.

Слюда належить до матеріалів з високою теплостійкістю (550...900°C), крихка, хоч і має достатню механічну міцність та вологостійкість. Слюда використовується в слюдяних конденсаторах, при виготовленні клеєних електроізоляційних матеріалів (міканіти, мікалекси, мікастрічки, мікофолій, слюденіти) та ізоляційних прокладок. Для склеювання слюдяних пластинок використовують кремнійорганічні та фенолформальдегідні смоли або лаки на основі цих смол.

Крім природної слюди для електричної ізоляції виробляють синтетичну слюду – *фторфлогопіт*. Він відрізняється від флогопіту тим, що в його кристалічних ґратах гідроксильні групи *ОН* заміщені іонами фтору *F*. Фторфлогопіти мають більш високу теплостійкість – до +1000°C.

**Оксидні діелектричні плівки** створюються на поверхні металу у вигляді хімічного з'єднання цього металу з киснем і називаються оксидною ізоляцією. Найкраща оксидна плівка  $Al_2O_3$  створюється на поверхні алюмінію. В звичайних умовах алюміній завжди покритий дуже тонкою оксидною плівкою, яка здатна як діелектрик витримувати лише невелику напругу – близько 1 В. Тому для забезпечення прийнятних діелектричних властивостей спеціальною обробкою алюмінію створюють значно товщу оксидну плівку (близько 0,01...0,07 мм), яка здатна

витримувати напругу 100...300 В [5]. Для цього використовують електрохімічну анодну обробку поверхні алюмінію.

Для ізоляції при виготовленні резисторів зі сплавів високого опору, а також електронагрівальних приладів використовується оксидна плівка, яка створюється шляхом термічного оксидування провідникового сплаву на повітрі при температурі до 900°C. Провідник з таким покриттям можна намотувати в котушці витками впритул один до одного.

Оксидна ізоляція використовується також для покриття пластин електротехнічної сталі, з яких збирають (шихтують) більшість магнітопроводів електричних машин, трансформаторів та інших видів електрообладнання змінного струму. Такої ізоляції цілком достатньо для обмеження вихрових струмів у магнітопроводах, незважаючи на невисоку електроізоляційну властивість плівки оксиду заліза [5].

## 2.6 Активні діелектрики

На властивості активних діелектриків можна впливати з допомогою зовнішніх енергетичних факторів: електричного або магнітного поля, механічної сили, температури або світлового потоку [6]. В активних діелектриках можуть спостерігатися сегнетоелектричний, п'єзоелектричний або електрооптичний ефекти.

### 2.6.1 Сегнетоелектрики

Залежно від механізму спонтанної поляризації сегнетоелектрик поділяють на *іонні* і *дипольні*.

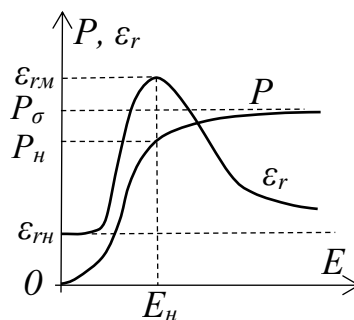
**Іонні сегнетоелектрики** – це кристали з переважно іонними зв'язками. До них відносяться титанат барію  $BaTiO_3$  ( $T_K=120^\circ C$ ), титанат свинцю  $PbTiO_3$  ( $T_K=490^\circ C$ ), титанат кадмію  $CdTiO_3$  ( $T_K=223^\circ C$ ), метаніобат свинцю  $PbNb_2O_6$  ( $T_K=570^\circ C$ ), ніобат калію  $KNbO_3$  ( $T_K=435^\circ C$ ), іодат калію  $KJO_3$  ( $T_K=210^\circ C$ ) [6].

**Дипольні сегнетоелектрики** – це речовини, атоми яких зв'язані між собою хімічно (ковалентно) зв'язані. До цих речовин відносяться сегнетова сіль  $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$  ( $T_K=24^\circ C$ ), тригліцинсульфат

$(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$  ( $T_K=49^\circ C$ ), нітрат натрію  $NaNO_2 \cdot 4H_2O$  ( $T_K=163^\circ C$ ), дигідрофосфат калію  $KH_2PO_4$  ( $T_K=-151^\circ C$ ) [6].

Дипольні і іонні сегнетоелектрики в елементарному осередку містять атом (іон) або групу атомів (іонів), які мають два положення рівноваги і створюють настільки сильне власне поле, що зумовлюють поляризацію навколишнього діелектрика без прикладання зовнішнього поля, внаслідок чого виникає спонтанна поляризація.

Самовільна (спонтанна) поляризація обумовлена наявністю відносно великих за розмірами областей (доменів), що мають сильне власне електричне поле – дипольний момент  $P_c = \sum p_0$  самовільної поляризації, де  $p_0$  – електричний (дипольний) момент елементарного осередку домену [6]. Зовнішнє електричне поле сприяє переважній орієнтації дипольних моментів доменів у одному напрямку, що дає ефект сильної поляризації  $P$  з відповідним збільшенням діелектричної проникності  $\epsilon_r$  до максимуму  $\epsilon_{rM}$  при  $E=E_n$  (рис. 2.19). Коли ж практично всі домени переорієнтувалися, то подальше підсилення зовнішнього електричного поля вже не здатне підвищити поляризацію більш ніж на  $P_\sigma$ . Тому для сегнетоелектриків характерна нелінійна залежність поляризованості  $P$  і діелектричної проникності  $\epsilon_r$  від напруженості зовнішнього електричного поля (рис. 2.13).

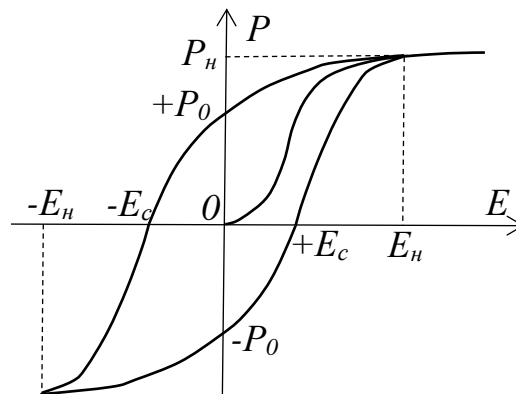


**Рисунок 2.13 – Залежність поляризованості  $P$  і діелектричної проникності  $\epsilon_r$  сегнетоелектрика від напруженості електричного поля  $E$**

Завдяки залежності  $\epsilon_r(E)$  самовільною поляризацією сегнетоелектриків можна керувати напруженістю зовнішнього електричного поля. Їх використовують для виготовлення малогабаритних низькочастотних

конденсаторів – варикондів, ємність яких змінюється при зміні напруженості прикладеного поля.

Процес переорієнтації електричних моментів доменів при зміні полярності напруженості електричного поля  $E$  супроводжується значними втратами енергії, тобто має місце діелектричний гістерезис аналогічно магнітному гістерезису (рис. 2.14), де  $P_0$  – залишкова поляризованість;  $E_c$  – коерцитивна сила. Площа петлі гістерезису пропорційна питомим втратам енергії за один цикл переорієнтації діелектричних доменів.



**Рисунок 2.14 – Залежність поляризованості  $P$  (Кл/м<sup>2</sup>) і діелектричної проникності  $\epsilon_r$  сегнетоелектрика від напруженості електричного поля  $E$**

Сегнетоэффект зникає при нагріванні діелектрика до температури Кюрі  $T_k$  незалежно від прикладеного ззовні електричного поля. При температурі  $T$  нижче  $T_k$  одне з положень рівноваги стає кращим – відбувається спонтанна поляризація, в елементарному осередку виникає дипольний момент. У результаті відбувається фазовий перехід діелектрика з параелектричного стану в сегнетоелектричний.

Для виготовлення запам'ятовувальних елементів обчислювальних машин сегнетоелектрики вибирають такими, щоб отримати максимально можливе значення діелектричної проникності  $\epsilon_r$  при мінімально можливій залежності  $\epsilon_r$  від температури і значенні коефіцієнта прямокутності петлі гістерезису  $K_{mg} = P_0/P_{nz} > 0,9$ .

### 2.6.2 Механічна напруженість

При поляризації під впливом електричного поля всі діелектрики змінюють свої геометричні розміри. Це явище називається електро-стрикцією. В більшості діелектриків це явище не має зворотного, тобто під впливом механічних сил діелектриків зазвичай не поляризується. Але існують тверді анізотропні кристалічні асиметричні діелектрики, які поляризуються під дією механічних напружень за відсутності зовнішнього електричного поля – на їх поверхні виникають електричні заряди. Це явище отримало назву “прямий п’єзоелектричний ефект”, а діелектрики з таким ефектом – п’єзоелектриками [6]. Виникаюча при цьому поляризованість п’єзоелектрика  $P$  (Кл/м<sup>2</sup>) і поверхневі електричні заряди густиною  $\sigma$  (Кл/м<sup>2</sup>) прямо пропорційні механічній напруженості  $G$  (Н/м<sup>2</sup>) з урахуванням полярності (напряму дії) механічної напруги:

$$P = \sigma = \pm d \cdot G \quad (2.12)$$

де  $d = 10^{-10} \dots 10^{-12}$  Кл/Н – коефіцієнт пропорційності, названий п’єзомодулем.

Прямий п’єзоэффект використовують для перетворення механічних напружень або деформацій в електричні сигнали – для виготовлення звукознімачів, датчиків деформацій, приймачів ультразвуків.

При *зворотному п’єзоелектричному ефекті* відбувається механічна деформація кристала  $\Delta l/l$ , пропорційна напруженості  $E$  прикладеного електричного поля:

$$\frac{\Delta l}{l} = \pm d \cdot E. \quad (2.13)$$

Зворотний п’єзоэффект використовують для перетворення електричних сигналів на механічні коливання – для виготовлення акустичних випромінювачів, генераторів ультразвуків. П’єзоелектрики, які використовують на практиці, можна поділити на три групи – монокристалічні п’єзоелектрики, п’єзокерамічні і полімерні п’єзоелектрики.

**Монокристалічні п’єзоелектрики.** Найбільш поширеним у використанні монокристалічним п’єзоелектриком є кварц. З монокристалу кварцу випилюють пластини, шліфують їх поверхні, напиляють

на них металеві електроди і утворюють таким чином електромеханічний резонатор з високою механічною добротністю і малим значенням  $\text{tg}\delta \approx 10^{-4}$  [6]. Якщо на такий резонатор подати змінну напругу, частота якої співпадає з частотою власних механічних коливань, то виникають сильні механічні коливання резонансної частоти, тобто проявляється зворотний п'єзоелектричний ефект. Такі пластинки використовуються як стабілізатори частоти. При механічному навантаженні на таку пластинку кварцу з тиском  $10^4$  Па виникає різниця потенціалів 6 мВ, тобто проявляється прямий п'єзоелектричний ефект. Крім монокристалічного кварцу використовуються також монокристали сульфату, ніобату і танталату літію та сегнетової солі, які мають ще кращі характеристики, ніж кварц.

**П'єзокераміка** – це поляризована сегнетокераміка [6]. Для подання сегнетокераміці п'єзоелектричних властивостей її витримують у сильному постійному електричному полі з напруженістю 2...4 МВ/м при температурі 100...150<sup>0</sup>С протягом близько години [6]. Після зняття дії поля кераміка зберігає залишкову поляризація і перетворюється в анізотропний стан. П'єзокераміку виготовляють в основному із полікристалічного сегнетоелектрика – цирконату-титанату свинцю (ЦТС)  $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ . Її головна перевага перед монокристалами – це можливість виготовлення активних елементів складної форми і будь-яких розмірів. Недоліком п'єзокераміки є занадто великі значення  $\epsilon_r$ ,  $\text{tg}\delta$  та механічних втрат, через що стає практично неможливим її використання на високих частотах.

**Полімерні п'єзоелектрики.** У плівках деяких полімерних матеріалів, текстурованих витяжкою і поляризованих у постійному електричному полі, може виникати п'єзо ефект. Серед таких матеріалів практичний інтерес викликає полівініліденфторид або фторопласт-2 [6]. При витягуванні плівки цього матеріалу на 300...400% утворюється особлива конформація полімерних ланцюгів, які в сильному електричному полі одержують п'єзо ефект. Полімерна п'єзокераміка за своїми властивостями близька до п'єзокераміки, але має перевагу – має приблизно в 4 рази меншу електронну «густину». Ця перевага та висока гнучкість роблять полімерну п'єзокераміку більш перспективним матеріалом у виробленні п'єзоелектричних перетворювачів.

### 2.6.3 Піроелектрики

**Піроелектричний ефект** – це здатність матеріалу змінювати спонтанну поляризацію  $\Delta P_c$  при зміні температури  $\Delta T$  за відсутності зовнішнього електричного поля:

$$\Delta P_c \approx p \cdot \Delta T, \quad (2.14)$$

де  $p$  – пірокоефіцієнт в Кл/(м<sup>2</sup>К), який залежить від температури, та досягає свого максимуму при  $T \approx T_k$  і падає до нуля при  $T > T_k$ .

Цей ефект має місце у всіх сегнетоелектриках через залежність спонтанної поляризації  $P_c$  від температури  $T$  при  $T < T_k$ , особливо поблизу точки Кюрі  $T_k$ . Піроелектричний ефект у найбільшій мірі проявляється в монокристалічному стані сегнетоелектрика, коли власні електричні поля монодоменних кристалів орієнтовані переважно в одному напрямку майже незалежно від зовнішнього електричного поля [6]. На відмінність від звичайного сегнетоелектрика, вектор спонтанної поляризації “ідеального” піроелектрика неможливо змінити зовнішнім електричним полем аж до стану електричного пробою. Піроелектрики використовуються в теплових детекторах, у тому числі в чутливих детекторах інфрачервоного випромінювання.

Для отримання монодоменних кристалів здійснюють поляризацію готового детектора або вирощеного монокристала постійним електричним полем при температурі  $T \ll T_k$  і фіксують поляризований стан шляхом опромінення, введенням певних летючих домішок або використанням пари електродів з різних металів [6]. Для виготовлення низькочастотних детекторів застосовують леговані або опромінені кристали тригліцинсульфат  $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$  ( $p=360$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r=25$ ). Найстабільніші піроелектричні властивості мають ніобат літію  $LiNbO_3$  ( $p=51$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r=29$ ) і танталат літію ( $p=176$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r=43$ ). Максимальний піроелектричний коефіцієнт  $p$  мають сегнетоелектрики зі значеннями  $T_k$ , близькими до кімнатної температури, наприклад, твердий розчин стронцій-барій-ніобат (СБН) ( $p=2800$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r=8200$ ,  $T_k=49^\circ\text{C}$ ) або матеріали на основі твердих розчинів титанату свинцю і цирконата свинцю, які леговані лантаном для зниження температури  $T_k$  до кімнатної температури ( $p=1760$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r=3980$ ).

**Електрокалоричний ефект** як зворотний піроелектричний – це здатність матеріалу змінювати температуру  $\Delta T$  внаслідок зміни напруженості  $\Delta E$  зовнішнього електричного поля:

$$\Delta T \approx q \cdot \Delta E, \quad (2.15)$$

де  $q$  – коефіцієнт електрокалоричного ефекту, який пропорційний піроелектричному коефіцієнту  $p$  і протилежний за знаком [6].

Електрокалоричний ефект можуть проявляти всі піроелектрики. У них при зміні напруженості  $\Delta E$  зовнішнього електричного поля відбувається зміна спонтанної поляризації  $\Delta P_c$ , що завдяки електрокалоричному ефекту призведе до охолодження або нагрівання кристалу в умовах адіабатичного процесу (при відсутності підведення або відведення тепла). Кристал нагрівається, якщо знак  $q$  позитивний і вектор напруженості  $E$  електричного поля співпадає з вектором спонтанної поляризації  $P_c$ , і охолоджується, якщо вектор  $E$  не співпадає з вектором  $P_c$ . Електрокалоричний ефект спостерігається в максимальній мірі в області фазового переходу сегнетоелектрика (при температурі  $T \approx T_k$ ), особливо, якщо  $T_k$  – кімнатна температура.

#### **2.6.4 Електрооптичні матеріали**

Електрооптичний ефект – це зміна діелектричної проникності  $\epsilon_r$ , показника переломлення  $n$  і розсіювання світла під дією зовнішнього електричного поля, а також під впливом теплового поля і тиску. Електрооптичні матеріали використовують для виготовлення активних елементів (модуляторів), призначених для зміни основних параметрів випромінювання в оптичному діапазоні за допомогою зовнішнього електричного поля. Технічною характеристикою електрооптичного ефекту матеріалів є напівхвильова напруга  $U_{\lambda/2}$ , при якій фаза вихідного із кристала світла змінюється на  $180^\circ$  [6]. Залежно від виду електрооптичного ефекту розрізняють *електрооптичні матеріали з лінійним, квадратичним і динамічним електрооптичними ефектами*.

**Матеріали з лінійним електрооптичним ефектом** мають лінійну залежність  $\epsilon_r$  і  $n$  від напруженості  $E$  електричного поля. До них відносяться кристали п'єзоелектриків і сегнетоелектриків, які не мають



центра симетрії [6]: кристали дигідрофосфату калію  $KH_2PO_4$  (область прозорості  $\lambda=0,2...1,35$  мкм  $U_{\lambda/2}=10$  кВ при  $\lambda=0,546$  мкм), ніобату літію  $LiNbO_3$  (область прозорості  $\lambda=0,4...0,5$  мкм,  $U_{\lambda/2}=3$  кВ при  $\lambda=0,546$  мкм), танталату літію  $LiTaO_3$  (область прозорості  $\lambda=0,3...0,6$  мкм,  $U_{\lambda/2}=1,5$  кВ при  $\lambda=0,546$  мкм). Окрім перелічених сегнетоелектричних кристалів використовуються також деякі кристали з кубічною структурою подібно до структури алмаза: телурід кадмію  $CdTe$  (область прозорості  $\lambda=2...28$  мкм,  $U_{\lambda/2}=53$  кВ при  $\lambda=0,546$  мкм), сульфід цинку  $ZnS$  (область прозорості  $\lambda=0,4...12$  мкм,  $U_{\lambda/2}=12$  кВ при  $\lambda=0,546$  мкм), хлориста мідь  $CuCl$  (область прозорості  $\lambda=0,4...20$  мкм,  $U_{\lambda/2}=6$  кВ при  $\lambda=0,546$  мкм). Такі кристали широко використовуються як модулятори лазерного випромінювання.

**Матеріали з квадратичним електрооптичним ефектом** не залежать від знака прикладеної напруги, але залежать від квадрата напруженості електричного поля. До них належать кристали, які мають центр симетрії а також деякі ізотропні рідкі середовища [6]: титанат барію  $Ba TiO_3$  (область прозорості  $\lambda=0,4...4,5$  мкм.,  $U_{\lambda/2}=0,5$  кВ при  $\lambda=0,546$  мкм).

**Матеріали з динамічним електрооптичним ефектом** мають безперервну хаотичну зміну показника переломлення світла в діелектриках під впливом зовнішнього електричного поля, а також в деяких випадках під впливом теплового поля і тиску. До цих матеріалів відносяться рідкі кристали, які перебувають у проміжному стані між твердим кристалічним і рідким ізотропним станами [6]. Рідкі кристали так само, як і сегнетоелектрики, мають доменну структуру. Тому в змінному електричному полі проявляється петля діелектричного гістерезису. У точці фазового переходу діелектрична проникність  $\epsilon_r$  має максимум, який зникає з підвищенням частоти. У рідких кристалах переорієнтація диполів повільна у порівнянні із сегнетоелектриками, і тому максимум  $\epsilon_r$  має місце при дуже низьких частотах (менше 1 Гц). Структура рідких кристалів дуже рухлива, легко змінюється під впливом зовнішнього енергетичного впливу (електричного або магнітного поля, температури, тиску), що призводить до змін електричних і оптичних властивостей. Ця особливість і покладена в основу роботи деяких приладів. Керуюче електричне поле може бути постійним або змінним при

частоті 100...10000 Гц. Оскільки рідкі кристали мають високий питомий опір ( $\rho=10^6...10^{10}$  Ом·м), то споживана ними потужність не перевищує 1 Вт/м<sup>2</sup>, що на декілька порядків менше споживаної потужності газорозрядних і люмінофорних індикаторів. Тому такі матеріали перспективні у використанні, особливо в малогабаритних електронно-обчислювальних машинах.

### **2.6.5 Електрети**

Електретами називають тверді діелектрики, які довго зберігають поляризований стан (залишкову поляризацію) і утворюють в навколишньому середовищі електростатичне поле – аналогічно постійним магнітам, які утворюють в навколишньому середовищі постійне магнітне поле [6]. Важливою характеристикою електретів є поверхнева густина зарядів  $\sigma$ . Значення  $\sigma$  помітно змінюється в перші години і навіть кілька діб після виготовлення електрета. Тому на практиці використовують сталі значення  $\sigma$ , яке називається поверхневою густиною стабілізованого заряду. Ця характеристика в різних діелектриках становить величину  $10^{-6}...10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

Заряд електрета в часі зменшується, у тому числі через електропровідність. Час розряду електрета з дуже високим питомим опором може становити багато років і навіть сотень років. Швидкість розряду електрета зростає з підвищенням температури і вологості навколишнього середовища.

Якщо пластинку електрета товщиною  $l_e$  помістити між обкладками плоского конденсатора, в якому передбачений повітряний проміжок шириною  $l_n$ , то напруженість електричного поля в цьому проміжку [6]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \left(1 + \varepsilon_r \frac{l_n}{l_e}\right)}, \quad (2.16)$$

де  $\sigma$  – густина залишкових електричних зарядів, Кл/м<sup>2</sup>;

$l_e, l_n$  – товщина пластинки електрета і повітряного проміжку, м;

$\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютна діелектрична проникність вакууму;

$\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність електрета.

Як електрети можуть використовуватися природні діелектрики (віск, парафін, каніфоль, янтар, шелак, слюда), синтетичні полімери (політетрафторетилен, полістирол, поліпропілен, полікарбонати, полівінілхлорид), неорганічні матеріали (сірка, сульфід кадмію  $CdS$ , сульфід цинку  $ZnS$ , ситалли), органічні сполуки (нафталін  $C_{10}H_8$ ), керамічні титановмістні матеріали. Наприклад, кераміка на основі  $CaTiO_3$  здатна мати найстійкіший залишковий заряд [6]:  $\sigma=80\dots250$  мкКл/м<sup>2</sup>,  $\epsilon_r=150$ ,  $\rho_v=10^{11}$  Ом·м.

Залежно від методу виготовлення відомі: термоелектрети (нагрівання до плавлення кристалічних або розм'якшення аморфних речовин з подальшим охолодженням у сильному електричному полі), електроелектрети (дія сильного електричного поля протягом декількох годин), короноелектрети (дія коронним розрядом у газовому проміжку між поверхнею діелектрика й електродом - найпоширеніший промисловий метод), фотоелектрети (дія світла і постійного електричного поля). Електрети використовуються як датчики сигналів або перетворювачі – електретні конденсаторні мікрофони, датчики тиску, вібродатчики, тахометри, дозиметри проникаючої радіації, барометри.

## **2.7 Приклади розрахунку завдань з визначення параметрів діелектричних матеріалів**

### **2.7.1 Визначення параметрів поляризації діелектриків**

**Завдання.** Розрахувати напруженість і енергію електричного поля, а також діелектричні втрати в двох різних діелектриках, які ізолюють обкладинки плоского конденсатора площею  $S=1,6$  м<sup>2</sup>. Конденсатор приєднаний до джерела синусоїдального струму з діючою напругою  $U=100$  В і частотою  $f=1$  кГц. Один з цих діелектриків має товщину  $l_1=3$  мм, відносну діелектричну проникність  $\epsilon_1=2$  і тангенс кута діелектричних втрат  $tg \delta_1=10^{-3}$ , а інший діелектрик – прошарок повітря шириною  $l_2=1$  мм.

**Розв'язок.** Оскільки діелектрики розміщені послідовно з напрямком дії сил електричного поля, то це відповідає двом послідовно з'єднаним конденсатором (1.4)

$$C_1 = \frac{S \cdot \varepsilon_1 \varepsilon_0}{l_1} = \frac{1,6 \cdot 2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{3 \cdot 10^{-3}} = 9,44 \cdot 10^{-9} \Phi;$$

$$C_2 = \frac{S \cdot \varepsilon_2 \varepsilon_0}{l_2} = \frac{1,6 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{10^{-3}} = 14,16 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

Електрична напруга  $U$  розподіляється між двома ділянками  $U_1$  і  $U_2$  електричної ізоляції прямо пропорційно реактивним опорам двох конденсаторів  $X_1=1/\omega C_1$  і  $X_2=1/\omega C_2$  (1.13). Виходячи з другого закону Кірхгофа  $U \approx U_1+U_2$ ,  $X \approx X_1+X_2$  і враховуючи дуже мале значення  $\text{tg} \delta$  запишемо

$$U_1 = \frac{X_2 U}{X_1+X_2} = \frac{C_2 \cdot U}{C_1+C_2} = \frac{14,16 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{9,44 \cdot 10^{-9} + 14,16 \cdot 10^{-9}} = 60 \text{ В};$$

$$U_2 = \frac{X_1 U}{X_1+X_2} = \frac{C_1 \cdot U}{C_1+C_2} = \frac{9,44 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{9,44 \cdot 10^{-9} + 14,16 \cdot 10^{-9}} = 40 \text{ В}.$$

Діюче значення напруженості електричного поля в кожному діелектрику (1.3)

$$E_1 = \frac{U_1}{l_1} = \frac{60}{3 \cdot 10^{-3}} = 20 \cdot 10^3 \text{ В/м}; \quad E_2 = \frac{U_2}{l_2} = \frac{40}{10^{-3}} = 40 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

Енергія електричного поля між обкладками конденсатора (1.5)

$$W_e = C \frac{U^2}{2} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1+C_2} \cdot \frac{U^2}{2} = \frac{9,44 \cdot 10^{-9} \cdot 14,16 \cdot 10^{-9}}{9,44 \cdot 10^{-9} + 14,16 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{100^2}{2} = 2,832 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Діелектричні втрати в першому діелектрику (2.2)

$$P_1 = U_1^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_1 \cdot \text{tg} \delta_1 = 60^2 \cdot 2\pi \cdot 10^3 \cdot 9,44 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-3} = \\ = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$$

Діелектричні втрати у повітрі дуже малі, і тому ними можна знехтувати.

## **2.7.2 Визначення параметрів електропровідності діелектриків**

**Завдання.** Розрахувати електричний струм, що споживається плоским конденсатором з обкладками  $10 \times 1000$  мм, які ізолювані між собою твердим діелектриком товщиною  $l=0,1$  мм. Діелектрик має

відносну діелектричну проникність  $\varepsilon_r=3$ , тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta=10^{-3}$ , питомий об'ємний опір  $\rho_v=10^8$  Ом·м і питомий поверхневий опір  $\rho_s=10^{10}$  Ом. Електричний струм розрахувати при під'єднанні конденсатора до електричного джерела: а) постійного струму з напругою  $U=100$  В; б) синусоїдального струму з діючою напругою  $U=100$  В і частотою  $f=400$  Гц.

### Розв'язок.

а) У разі приєднання до електричного джерела постійного струму конденсатор споживає лише об'ємний  $I_v$  і поверхневий  $I_s$  електричні струми, які визначаються, відповідно, об'ємним  $R_v$  і поверхневим  $R_s$  опорами (2.9):

$$I_v = \frac{U}{R_v} = \frac{U}{\rho_v \frac{l}{S}} = \frac{100}{10^8 \frac{10^{-4}}{10^{-2}}} = 10^{-4} \text{ A};$$

$$I_s = \frac{U}{R_s} = \frac{U}{\rho_s \frac{l}{L}} = \frac{100}{10^{10} \frac{10^{-4}}{(0,01 + 1) \cdot 2}} = 2,02 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$

Загальний електричний струм, який споживає конденсатор при постійній напрузі (струм витоку):

$$I_e = I_v + I_s = 10^{-4} + 2,02 \cdot 10^{-4} = 0,302 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

б) У разі приєднання конденсатора до електричного джерела синусоїдального струму тієї ж самої напруги  $U=100$  В діюче значення струму витоку  $I_e$  таке саме, як і в попередніх розрахунках, тобто  $I_e=3,02 \cdot 10^{-4}$  А. Цей струм співпадає за фазою із синусоїдальною напругою  $U$ , тобто є активним. Додатково до цього струму конденсатор буде споживати зарядно-розрядний струм  $I_c$  відповідно до величини реактивного опору  $X=1/\omega C$  конденсатора (1.13) тоді

$$I_c = \frac{U}{X_c} = U\omega C = U\omega \frac{S \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0}{l} = 100 \cdot 2\pi \cdot 400 \frac{10^{-2} \cdot 3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{0,1 \cdot 10^{-3}}$$

$$= 0,667 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Зарядно-розрядний струм  $I_c$  випереджає за фазою синусоїдальну напругу  $U$  на кут  $\varphi = \pi/2 - \delta = \pi/2 - 10^{-3} \approx \pi/2$ , тобто є по суті чисто реактивним. Загальне діюче значення синусоїдального струму, що споживає конденсатор (1.11):

$$I = \sqrt{I_g^2 + I_c^2} = \sqrt{(0,302 \cdot 10^{-3})^2 + (0,667 \cdot 10^{-3})^2} = 0,732 \cdot 10^{-3} A.$$

### **2.7.3 Визначення параметрів електричного пробою діелектриків**

**Завдання.** Обкладинки плоского конденсатора ізольовані між собою двома діелектриками. Один з цих діелектриків має товщину  $l_1 = 1$  мм, відносну діелектричну проникність  $\epsilon_{r1} = 15$  і електричну міцність  $E_{np1} = 20$  МВ/м, а інший діелектрик – прошарок повітря шириною  $l_2 = 0,5$  мм, електрична міцність якого при цій ширини складає  $E_{np2} = 5$  МВ/м [5]. Розрахувати два значення електричної напруги  $u_{np}$  між обкладинками такого конденсатора, при якій відбудеться а) частковий пробій і б) повний пробій його електричної ізоляції.

**Розв'язок.** При заданому розміщенні двох діелектриків (послідовно з напрямом к дії сил електричного поля) конденсатор можна розглядати як дві послідовно з'єднані ємності  $C_1$  і  $C_2$  з різними значеннями товщини діелектрика, напруги і напруженості електричного поля.

Ємності цих конденсаторів можна розрахувати за формулами (1.4):

$$C_1 = \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_0}{l_1} S; C_2 = \frac{\epsilon_{r2} \epsilon_0}{l_2} S; C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_{r2} \epsilon_0}{\epsilon_{r1} l_2 + \epsilon_{r2} l_1} S.$$

Електрична напруга  $u$  конденсатора розподіляється між двома ділянками діелектрика обернено пропорційно ємностям конденсаторів, виходячи з умов  $Q_1 = Q_2$ ,  $C_1 u_1 = C_2 u_2$  і  $u_1 + u_2 = u$ :

$$u_1 = \frac{C_2 u}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_{r2} l_1 u}{\epsilon_{r1} l_2 + \epsilon_{r2} l_1}; u_2 = \frac{C_1 u}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_{r1} l_2 u}{\epsilon_{r1} l_2 + \epsilon_{r2} l_1}.$$

Напруженість електричного поля в кожному із діелектриків (1.3):

$$E_1 = \frac{u_1}{l_1} = \frac{\varepsilon_{r2} l_1 u}{(\varepsilon_{r1} l_2 + \varepsilon_{r2} l_1) \cdot l_1} = \frac{\varepsilon_{r2} u}{\varepsilon_{r1} l_2 + \varepsilon_{r2} l_1}; E_2 = \frac{u_2}{l_2} = \frac{\varepsilon_{r1} l_2 u}{(\varepsilon_{r1} l_2 + \varepsilon_{r2} l_1) \cdot l_2} = \frac{\varepsilon_{r1} u}{\varepsilon_{r1} l_2 + \varepsilon_{r2} l_1}.$$

З наведених формул і числових даних видно, що пробій діелектрика відбудеться в першу чергу у повітряному прошарку, в якому виникає більша напруженість електричного поля  $E_2$  і який має меншу електричну міцність  $E_{np2}$ . Цей пробій можна назвати частковим, тому що він не приведе до повного пробою ізоляції конденсатора. Частковий пробій відбудеться при напрузі між обкладинками конденсатора  $u \geq u_a$  за умови  $E_2 \geq E_{np2}$ :

$$u \geq u_a = E_{np2} \frac{\varepsilon_{r1} l_2 + \varepsilon_{r2} l_1}{\varepsilon_{r1}} = 5 \cdot 10^6 \frac{15 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{15} = 2833 \text{ В}.$$

Внаслідок часткового пробою повітряного прошарку при  $u > u_a$  вся напруга  $u$  буде прикладена до першого діелектрика, і тому напруженість електричного поля в першому діелектрику буде визначатись іншою формулою ( $E_1 = u/l_1$ ). Повний пробій відбудеться при напрузі між обкладинками конденсатора  $u \geq u_b$  за умови  $E_1 \geq E_{np1}$ :

$$u \geq u_b = E_{np1} l_1 = 20 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 20000 \text{ В}.$$

Таким чином, при напрузі між обкладинками конденсатора  $u \geq 2833$  В відбудеться частковий пробій, а при  $u \geq 20000$  В – повний пробій його ізоляції.

#### **2.7.4 Визначення параметрів активних діелектриків**

**Завдання.** Пластинка діелектрету товщиною  $l_1 = 20$  мм на основі титанового матеріалу  $\text{CaTiO}_3$  з діелектричною проникністю  $\varepsilon_r = 150$  отримала залишковий електричний заряд густиною  $\sigma = 200$  мкКл/м<sup>2</sup> внаслідок тривалої дії сильного електричного поля. Цю пластинку розмістили між металевими паралельними обкладинками плоского конденсатора з деяким повітряним прошарком шириною  $l_2$  з метою створення в ньому електростатичного поля напруженістю  $E_2 = 1$  МВ/м. Необхідно розрахувати ширину  $l_2$  повітряного прошарку.

**Розв'язок.** Для розрахунку ширини  $l_2$  повітряного прошарку конденсатора можна скористатись формулою (2.16):

$$E_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \left(1 + \varepsilon_r \frac{l_2}{l_1}\right)}; l_2 = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 E_2} - 1\right) \frac{l_1}{\varepsilon_r}$$
$$= \left(\frac{200 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^6} - 1\right) \frac{20 \cdot 10^{-3}}{150} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Таким чином, товщина повітряного прошарку має дорівнювати 2,9 мм для отримання в ньому електростатичного поля напруженістю 1 МВ/м за допомогою заданої пластинки електрету.

## 2.8 Контрольні запитання

1. Які основні властивості мають діелектричні матеріали?
2. Наведіть основні відмінності діелектрика від провідника електричного струму.
3. Який фізичний закон закладений у процес поляризації діелектрика?
4. Що таке відносна діелектрична проникність діелектрика?
5. В яких випадках діелектрик з великою відносною діелектричною проникністю має переваги?
6. Який існує зв'язок між ємністю конденсатора і відносною діелектричною проникністю.
7. Поясніть схему експериментального визначення відносної діелектричної проникності.
8. Поясніть вплив змінного електричного поля на поведінку діелектрика.
9. Що таке електричний струм зміщення в діелектрику?
10. Поясніть відмінність електричного струму зміщення в діелектрику конденсатора від його зарядно-розрядного струму.
11. Яким чином передається у просторі силовий вплив електричного поля?
12. Від чого залежить електропровідність діелектрика?



13. Які електричні заряди можуть створювати електричний струм у газоподібному діелектрику?
14. Як використовують електропровідність газоподібних діелектриків?
15. Як пов'язана електропровідність газоподібного діелектрика з емісією електронів з катода?
16. Чим відрізняються між собою електропровідності рідких і газоподібних діелектриків?
17. Поясніть здатність дуже розрідженого повітря або вакууму одночасно виконувати функцію діелектрика і «надпровідника».
18. Чим відрізняється електропровідність твердих діелектриків від електропровідності рідких і газоподібних діелектриків?
19. Що таке об'ємна і поверхнева електропровідність діелектрика? Поясніть принцип визначення об'ємного і поверхневого опору твердого діелектрика.
20. При якій напрузі (постійній чи змінній) необхідно вимірювати опір діелектриків? Як може впливати поляризація діелектрика на результати виміру його опору?
21. Що таке діелектричні втрати? Що характеризує тангенс кута діелектричних втрат?
22. За якими формулами можна розрахувати діелектричні втрати?
23. Яким чином впливають частота і напруженість електричного поля та діелектрична проникність на діелектричні втрати?
24. Поясніть схему експериментального визначення тангенса кута діелектричних втрат.
25. Опишіть явище електричного пробоя діелектрика.
26. Що таке електрична міцність діелектрика?
27. Поясніть залежність електричної міцності діелектрика від його товщини.
28. Чому електрична міцність газоподібних діелектриків значно менше електричної міцності рідких і твердих діелектриків?
29. Пояснити залежність електричної міцності рідкого діелектрика від його температури та вмісту в ньому води та інших домішок.
30. Охарактеризуйте основні види пробоя твердих діелектриків.
31. Поясніть схему експериментального визначення електричної міцності діелектриків.
32. Що таке теплостійкість діелектриків?

33. Як розподіляються електроізоляційні матеріали за окремими класами нагрівостійкості.
34. Яке практичне значення мають теплостійкість і нагрівостійкість електроізоляційних матеріалів?
35. Яким чином впливає температура діелектрика на його основні функції?
36. Наведіть найбільш важливі причини нагрівання діелектриків.
37. Чим відрізняється теплостійкість діелектриків від їх теплопровідності?
38. Яке практичне значення має теплопровідність діелектриків?
39. Що таке конвекція і яке відношення вона має до теплопровідності діелектрика?
40. Які з газоподібних діелектриків найбільш поширені у використанні газоподібні діелектрики.
41. Які переваги має водень як діелектрик у порівнянні з повітрям?
42. Наведіть основні переваги елегазу в порівнянні з повітрям.
43. Назвіть основні переваги рідких діелектриків над газоподібними і твердими діелектриками.
44. Які матеріали використовують для виготовлення рідких діелектриків?
45. Назвіть основні переваги твердих діелектриків над газоподібними і рідкими діелектриками.
46. Чому повітряні порожнечі в твердих діелектриках погіршують якість діелектриків?
47. В чому полягає користь просочення твердих діелектриків рідкими діелектриками?
48. Назвіть головні компоненти пластмас.
49. Чим відрізняються між собою термопластичні та термореактивні смоли та полімери?
50. В яких випадках можна використовувати оксидні плівки як електричну ізоляцію?

### 3 ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

До провідникових матеріалів відносяться метали та їх сплави, вуглецеві матеріали, розчини, розплави електролітів та іонізовані гази, які використовуються як провідники електричного струму у поєднанні з електроізоляційними матеріалами. Найбільш широкого використання набули тверді метали та їх сплави. З металів високої електропровідності з питомим опором не більше  $0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  виготовляють електричні проводи, жили електричних кабелів, обмотки трансформаторів та електричних машин. З металів і сплавів з питомим опором не менше  $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  виготовляють резистори та електронагрівальні прилади.

Деякі інші матеріали та хімічні сполуки також здатні виконувати електропровідні функції, якщо для цього створені особливі умови. Маються на увазі надпровідники та кріопровідники в умовах наднизьких температур, а також напівпровідники під впливом додаткових фізичних факторів. Надпровідники зовсім не створюють, а кріопровідники майже не створюють опір електричному струму. Вони мають обмежене використання через складність створення умов наднизьких (криогенних) температур. Напівпровідники дуже швидко розширюють сферу свого використання в електротехніці і особливо в електроніці завдяки їх специфічним та керованим електропровідним властивостям.

#### 3.1 Фізичні процеси та явища, що спостерігаються в провідникових матеріалах

Головним фізичним процесом у провідникових матеріалах є переміщення вільних зарядів (електронів та іноді іонів) під дією напруженості електричного поля. Електричний струм у металах в твердому і в рідкому їх стані обумовлений переміщенням лише електронів, і тому метали відносяться до провідників першого роду. Цей струм супроводжується тепловим, електричним і магнітним полями, а також емісійними і контактними явищами. Виключенням є надпровідники, які в стані надпровідності не виділяють теплову енергію.

У провідникових матеріалах другого роду переміщуються не тільки електрони, але й іони як носії речовини. Тому електричний струм у провіднику другого роду додатково супроводжується переміщенням речовини, відкладенням цієї речовини на підведених електродах та зміною хімічного складу цього провідника. До провідників другого роду або електролітів відносяться водяні, кислотні та лужні розчини різноманітних речовин та розплави кристалічних речовин з іонною структурою. До провідників другого роду відносяться також пари рідин і металів та сильно іонізований газ (плазма) за умови, якщо напруженість електричного поля перевищує напруженість ударної або фотонної іонізації.

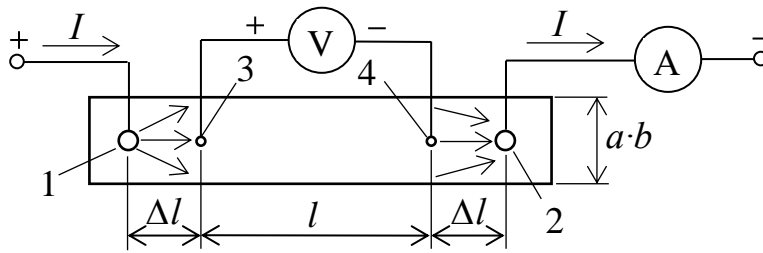
### **3.1.1 Активний опір провідникових матеріалів**

Електричний опір, який обумовлений зміною в часі енергії теплового поля, називається активним  $R$ , а відповідне падіння напруги – активним падінням  $u_a$ . Активний опір  $R$  провідника виникає як при постійному, так і при змінному електричному струмі. Він обумовлений опором мікрочастинок цього провідника руху електронів і враховує процес виділення (зміни в часі  $t$ ) теплової енергії

$$W_T=f(t)=Pt=I^2Rt.$$

**Вимірювання активного опору  $R$**  здійснюють зазвичай при постійному струмі  $I$  за методом амперметра і вольтметра з наступним його обчисленням  $R=U/I$ . Якщо потрібно визначити питомий опір провідника дроту  $\rho$  за величиною  $R$ , то для виміру  $R$  необхідно виключити вплив перехідного опору в контактах і створити однакову густину електричного струму у всіх точках проводу в межах його довжини  $l$  (рис. 3.1).

Перехідний опір у силових клеммах 1 і 2 підключення провідника до джерела струму та нерівномірність розподілу густини струму майже не впливають на результати виміру опору  $R$ , якщо потенціальні клеми 3 і 4 для виміру напруги  $U$  знаходяться на достатній відстані  $\Delta l$  від клем 1 і 2. Зразок провідника повинен мати постійну площу поперечного перерізу  $S$  на ділянці між потенціальними клеммами 3 і 4 для забезпечення



**Рисунок 3.1 – Схема для виміру активного опору  $R$  провідника при постійному струмі**

постійності густини електричного струму. Питомий опір  $\rho$  (Ом·м) можна розрахувати за такою формулою:

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (3.1)$$

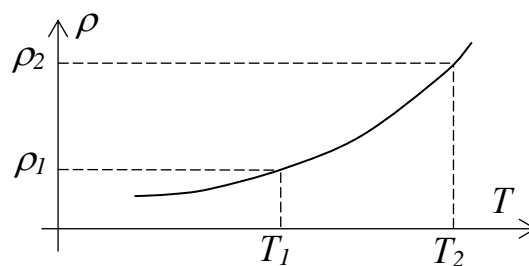
де  $S$  – площа поперечного перерізу зразка провідникового матеріалу, м<sup>2</sup>;

$l$  – відстань між потенціальними клемами 3 і 4 для виміру напруги  $U$ , м;

$R = U/I$  – активний опір зразка провідникового матеріалу як результат виміру за методом амперметра і вольтметра (рис.3.1).

З чотирма клемми (рис. 3.1) виготовляють також спеціальні вимірювальні шунти, за допомогою яких вимірюють електричний струм шляхом виміру з допомогою достатньо чутливим вольтметром падіння напруги  $U$  на ділянці клем 3 і 4 з наступним розрахунком струму за формулою  $I=U/R$ . Деякі амперметри мають вбудовані вимірювальні шунти.

**Вплив температури на питомий опір  $\rho$**  більшості провідникових матеріалів доволі суттєвий і має пропорційний характер (рис. 3.2).



**Рисунок 3.2 – Графік впливу температури  $T$  на питомий опір  $\rho$  провідникового матеріалу**

При зміні температури  $T$  у незначних межах допускається кусково-лінійна апроксимація нелінійної залежності  $\rho$  від  $T$ :

$$\rho_2 \approx \rho_1[1 + \alpha_\rho(T_2 - T_1)], \quad (3.2)$$

де  $\rho_1, \rho_2$  – питомий опір провідникового матеріалу (Ом·м) при температурі, відповідно,  $T_1$  і  $T_2$  (табл. 3.1, [8]);

$\alpha_\rho$  – середній температурний коефіцієнт питомого опору ( $K^{-1}$ ) в діапазоні температур  $T_1...T_2$  (табл. 3.1, [8]).

Таблиця 3.1 – Основні провідникові властивості деяких металів при 20°C

Метал	Густина $d$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_\rho$ , К <sup>-1</sup>	$T_{\text{плав.}}$ , °С	Робота $A$ виходу електрона, еВ	Абсолютна питома термо-ЕРС $\psi$ , мкВ/К
Срібло - (Ag)	10,49	0,015	0,0041	961	4,3	+1,5
Мідь - (Cu)	8,92	0,0170	0,0043	1083	4,4	+1,8
Алюміній - (Al)	2,70	0,026	0,0041	660	4,25	-1,3
Вольфрам - (W)	19,3	0,055	0,0050	3400	4,54	+2,0
Кобальт - (Co)	8,85	0,064	0,0060	1500	4,41	-20,1
Нікель - (Ni)	8,96	0,068	0,0067	1453	4,5	-19,3
Залізо - (Fe)	7,87	0,097	0,0062	1540	4,31	+16,6
Платина - (Pt)	21,45	0,098	0,0039	1770	5,32	-5,1
Олово - (Sn)	7,29	0,113	0,0045	232	4,38	-1,1
Хром - (Cr)	7,19	0,13	0,0024	1900	4,58	+18
Свинець - (Pb)	11,34	0,19	0,0042	327	4,0	-1,2
Ртуть - (Hg)	13,5	0,958	0,0009	-39	4,52	+8,1
Вісмут - (Bi)	9,80	1,16	0,0042	271	4,4	-75

У більшості металів при переході з твердого стану в рідкий суттєво збільшується питомий опір через зменшення густини розплавленого металу. Наприклад, коефіцієнт збільшення питомого опору при плавленні становить 2,4 для міді і 1,64 для алюмінію [5]. Виключення складають галій Ga і вісмут Bi, у яких при переході з твердого стану в рідкий питомий опір зменшується приблизно вдвічі через збільшення густини розплавленого металу.

**Питомий опір сплавів** залежить не тільки від концентрації компонентів, але й від формування структури остиглого сплаву. Якщо сплавлуються два метали у вигляді спільного розчину, то при його затвердінні створюється єдина кристалева решітка. У таких випадках питомий опір може суттєво збільшуватися з формуванням екстремальної залежності  $\rho$  і  $\alpha_\rho$  від вмісту одного з компонентів сплаву. На рисунку 3.3 розглянута така залежність на прикладі сплаву міді Cu з нікелем Ni.

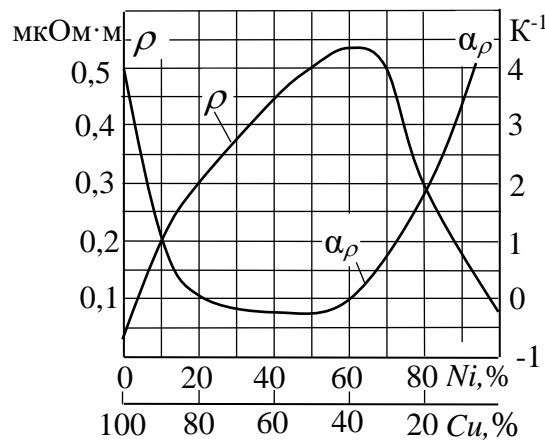


Рисунок 3.3 – Залежність  $\rho$  і  $\alpha_\rho$  сплаву мідь-нікель від його складу [5]

Якщо при затвердінні сплаву двох металів створюються окремі кристалеві решітки, то питомий опір залежить від вмісту одного з компонентів сплаву приблизно лінійно [5].

**Вплив частоти струму на активний опір** провідника обумовлений ефектом витіснення впливу змінного електричного струму на поверхню провідника (скін-ефектом). На рис.3.4 зображена схема, яка пояснює цей ефект у разі, коли навколо провідника немає замкнених магнітопроводів.

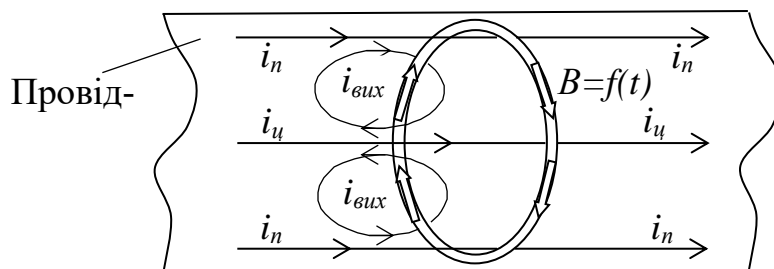


Рисунок 3.4 – Схема витіснення впливу змінного струму на поверхню провідника

Для пояснення цього ефекту розглянемо змінні (синусоїдальні) струми в центральній  $i_c$  і в периферійній  $i_n$  частинах електричного провідника, які зображені векторами. Ці струми спричиняють замкнені лінії змінної магнітної індукції  $B=f(t)$  за правилом буравчика в площині, перпендикулярній векторам струмів. Магнітна індукція  $B=f(t)$  у свою чергу відповідно до закону електромагнітної індукції (1.22) спричиняє електрорушійні сили та вихрові струми  $i_{вих}$  в площині, перпендикулярній вектору магнітної індукції. Ці струми пропорційні відношенню  $\frac{dB}{dt}$ , а значить пропорційні частоті струму.

На рисунку 3.4 видно, що вихрові струми  $i_{вих}$ , спрямовані назустріч струму  $i_c$ , в центральній частині провідника, співпадають за напрямком зі струмами  $i_n$  в периферійній частині провідника. Таким чином створюються умови витіснення впливу струму з центральної частини провідника  $i_c$  на його поверхню, що призводить до збільшення активного опору провідника пропорційно частоті електричного струму. Тому при дуже високій частоті через скін-ефект вигідно використовувати провідники трубчастого (коаксіального) вигляду або багатожильні провідники з дуже тонкими ізольованими між собою жилами.

В електричних машинах, в яких навколо провідників зі змінним струмом є замкнені магнітопроводи, скін-ефект проявляється дещо по-іншому. Це пов'язано з тим, що лінії магнітної індукції  $B=f(t)$  замикаються в основному в магнітопроводах завдяки їх великій магнітній проникності. Характерним прикладом використання цього ефекту є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, в провідниках якого струм витісняється у бік зовнішньої поверхні ротора в період пуску двигуна. Завдяки цьому покращуються умови пуску такого двигуна.

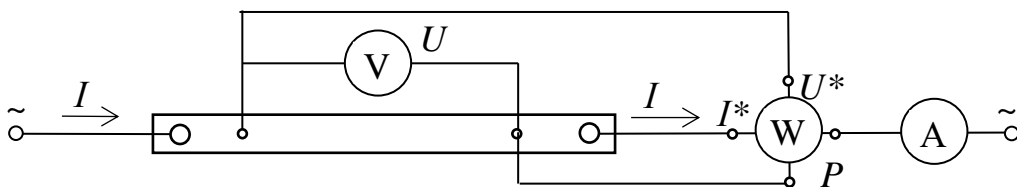
### **3.1.2 Реактивний опір провідникових матеріалів**

Електричний опір, який зумовлений синусоїдальним струмом та відповідною зміною в часі енергії електричного або магнітного поля, називається реактивним опором. Реактивний опір, який пов'язаний зі зміною енергії електричного поля, називається ємнісним опором  $X_c = \frac{1}{\omega C}$ , а відповідне падіння напруги – ємнісним падінням напруги  $u_c$  (1.13). Реактивний опір, який пов'язаний зі зміною енергії магнітного поля,



називається індуктивним опором  $X_L = \omega L$ , а відповідне падіння напруги – індуктивним падінням напруги  $u_L$  (1.25).

Реактивний опір визначається лише геометричними параметрами електричного провідника та окремих його частин. Тому він не має прямого відношення до властивостей матеріалу провідника та його ізоляції. Реактивний опір може лише опосередковано впливати на результати визначення цих властивостей у разі використання змінного струму чи напруги. Наприклад, якщо треба визначити активний і реактивний опори провідника під дією синусоїдального струму, то необхідно врахувати залежність електричного струму не тільки від падіння напруги на активному опорі  $R$  (рис. 3.1), але й від падіння напруги на індуктивному  $X_L$  і ємнісному  $X_C$  опорах. Для цього, крім амперметра і вольтметра, потрібен додатковий прилад – ватметр (рис. 3.5).



**Рисунок 3.5 – Схема виміру активного і реактивного опорів при змінному струмі**

За результатами вимірювань за схемою на рисунку 3.5 можна розрахувати активний  $R$  і реактивний  $X$  опори за допомогою таких формул:

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{U^2}{P}; X = \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R^2}, \quad (3.3)$$

де  $I, U$  – діючі значення синусоїдального струму і напруги (1.11);

$P$  – активна потужність (показання ватметра).

Якщо струм змінюється за неперіодичним законом, то поняття реактивного опору стає некоректним, оскільки реактивний опір має значення лише при синусоїдальному законі зміни струму і напруги.

### 3.1.3 Еквівалентні схеми електричних провідників

Існує декілька еквівалентних схем провідника електричного струму залежно від його геометричних параметрів, частоти електричного струму та деяких інших обставин. Еквівалентна схема провідника має найбільш простий вид, якщо електричний струм не змінюється в часі або якщо його величина не супроводжується суттєвими змінами енергії магнітного або електричного поля (рис. 3.6, а). У цьому разі проявляється лише енергія теплового поля, що в еквівалентній схемі враховано активним опором  $R$ .

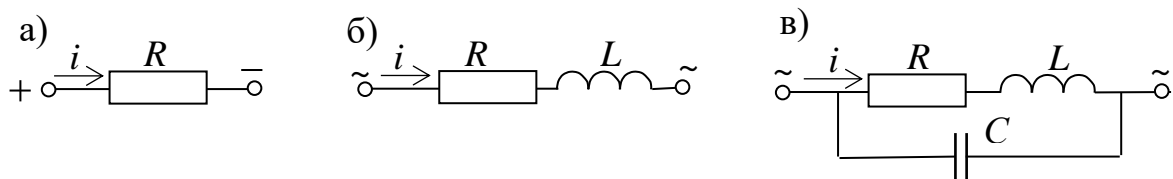


Рисунок 3.6 – Еквівалентні схеми електричного провідника

Якщо в провіднику існує змінний електричний струм, то додатково виникає енергія магнітного поля через її зміни. Для врахування проявів магнітного поля в еквівалентну схему провідника додають індуктивність  $L$  (рис. 3.6, б). Ця схема використовується зазвичай при виготовленні з провідників дроту котушки індуктивності чи електричного дроселя низької частоти. Інколи доводиться користуватися цією схемою навіть при постійному струмі, якщо провідник розмикається або замикається. Якщо ж у провіднику котушки індуктивності існує струм високої частоти, або коли струм має значні високочастотні складові, то доводиться враховувати ще й електричне поле. Для цього в еквівалентній схемі провідника використовують ємність  $C$  (рис. 3.6, в).

У тих випадках, коли задіяні системи провідників електричного струму, між якими існує тісний взаємозв'язок через магнітні та електричні поля, то використовують спеціальні еквівалентні електричні схеми. Прикладами таких систем є довгі повітряні та особливо кабельні лінії електропостачання, трансформатори, електричні машини, імпульсні електронні системи та високочастотні лінії з розподіленими у просторі параметрами.

### 3.1.4 Емісійні і контактні явища в металах

*Емісія електронів* – це явище виходу електронів з поверхні металу. В металі дуже багато практично вільних електронів. Для їх переміщення майже не потрібно витратити енергію. Але для виходу кожного електрона за межі металу потрібно все ж виконати деяку роботу  $A$  для подолання потенціального бар'єру (різницю потенціалів  $\phi$ ) на межі метал-вакуум:

$$A = q_e \cdot \phi = W_{\text{вак}} - W_{\phi}, \quad (3.4)$$

де  $q_e = 1,602 \times 10^{-19}$  Кл – модуль заряду електрона (за знаком від негативний);

$W_{\text{вак}}$  – енергія електрона у вакуумі;

$W_{\phi}$  – енергія електрона в найвищому заповненому рівні твердого металу при температурі абсолютного нуля за шкалою Кельвіна (рівень Фермі).

Потенціальний бар'єр  $\phi$  обумовлений силами притягування електрона до атома чи молекули, яка при виході електрона стає позитивним іоном (“діркою”), а також силами відштовхування від тих електронів, які вже вийшли з металу і утворили поблизу поверхні цього металу електронну “хмару”. Робота  $A$  виходу електрона з поверхні більшості чистих металів при температурі  $+20^\circ\text{C}$  складає близько 4 еВ (електрон-вольт), див. таблицю 3.1. Емісія електронів при такій низькій температурі називається холодною (автоелектронною) емісією. Для деяких сплавів та оксидів металів величина  $A$  може бути значно меншою, що дозволяє використовувати їх для покриття чистого металу і створення таким чином більш сприятливих умов практичного використання емісії електронів. Наприклад, якщо на поверхню вольфраму  $W$  нанести шар оксиду лужноземельного металу (галію Ga, стронцію Sr, барію Ba), то робота виходу  $A$  знизиться з 4,54 еВ до 1,2...2 еВ, а густина потоку емісійних електронів збільшиться на декілька порядків [6].

Емісію електронів у вакуумі використовують у різноманітних електронних приладах. У цих приладах практично повністю видаляють повітря, щоб воно не заважало переміщенню емісійних електронів. Для зниження напруженості електричного поля і підвищення густини

поток емісійних електронів до прийнятних значень використовують гарячу (термоелектронну) емісію. Для цього поверхню металу (емітер або катод) нагрівають до температури 1700...2200°C.

**Контактна різниця потенціалів** виникає при контакті між собою двох різних металів. Тому в просторі, що оточує метали, утворюється електричне поле. Причина цього явища – різне значення роботи  $A$  виходу електрона і різна концентрація електронів провідності у різних металів. При контакті різних металів частина електронів провідності переходить від металу з меншою роботою  $A$ , заряджаючи його позитивно, до іншого металу, заряджаючи його негативно. Контактна різниця потенціалів  $\phi_{12}$  двох контактуючих металів відповідно до класичної електронної теорії може бути розрахована за формулою

$$\phi_{12} = \phi_2 - \phi_1 + \frac{kT}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (3.5)$$

де  $\phi_1, \phi_2$  – потенціальний бар'єр для виходу електрона за межі, відповідно, першого і другого металу (3.4);

$n_1, n_2$  – концентрація електронів провідності, відповідно, в першому і другому металах (2.10);

$k = 1,3806488 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – фізична стала Больцмана, яка визначає зв'язок між температурою і енергією;

$T$  – температура двох металів у місці їх контакту, (вимірюється в Кельвінах).

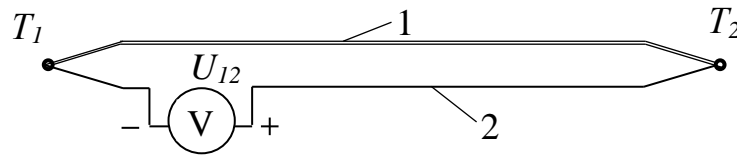
### **Термоелектрорушійна сила. Ефект Зеєбека**

Для виміру контактної різниці потенціалів  $\phi_{12}$  (3.5) потрібен ще один контакт для створення замкнутого вимірювального контуру, тобто потрібна мінімум пара спаяних контактів (спаїв). Якщо температури цих спаїв  $T_1$  і  $T_2$  однакові ( $T_1=T_2=T$ ), то сума двох контактних різниць потенціалів  $U_{12}$  в цьому контурі згідно з формулою (3.5) буде нульовою ( $U_{12}=\phi_{12}+\phi_{21}=0$ ). Якщо  $T_1 \neq T_2$ , то сума двох контактних різниць потенціалів  $U_{12}$  в цьому контурі (термоелектрорушійна сила) згідно з виразом (3.5) буде відрізнятися від нуля (рис. 3.7) [5]:

$$\begin{aligned}
 U_{12} &= \phi_2 - \phi_1 + \frac{kT_1}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2} - \phi_2 + \phi_1 + \frac{kT_2}{q_e} \ln \frac{n_2}{n_1} = \\
 &= \frac{k}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_1 - T_2) \approx \psi_{12} \cdot (T_1 - T_2), \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

де  $\psi_{12} = \frac{k}{q_e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2}$  – відносна питома термоелектрорушійна сила (термоЕРС) для вибраної пари провідників чи напівпровідників (коефіцієнт термоЕРС або коефіцієнт Зеєбека), В/К;

$T_1 - T_2 = \Delta T$  – різниця температур двох спаїв, К.



**Рисунок 3.7 – Картина руху теплорушійної сили в термопарі**

Знак приблизної рівності у формулі (3.6) обумовлений тим, що в ній не врахований електротермічний ефект Томсона. Більш точна формула для визначення термоелектрорушійної сили має вигляд [8]

$$U_{12} = \int_T^{T+\Delta T} \psi_{12} dT \approx \psi_{12} \Delta T \quad (3.7)$$

При цьому, враховуючи доцільність абсолютної системи відліку питомої термоелектрорушійної сили, коефіцієнт  $\psi_{12}$  можна розрахувати так:

$$\psi_{12} = \psi_1 - \psi_2 = \psi_{13} - \psi_{23}, \quad (3.8)$$

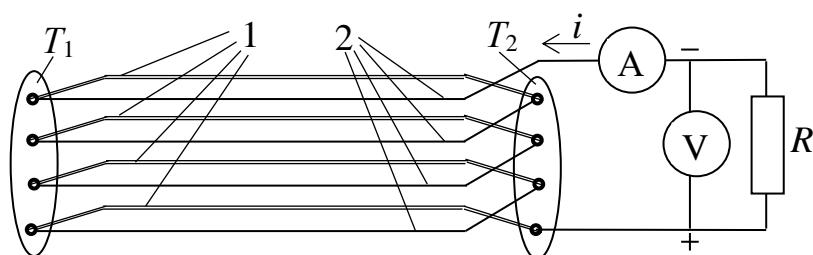
де  $\psi_1$  і  $\psi_2$  – абсолютні питомі термоЕРС окремо для першого і другого провідників чи напівпровідників вибраної пари.

Кінцева частина формули (3.8) означає, що розрахувати термоЕРС однієї речовини відносно іншої можна не тільки за абсолютною питомою термоЕРС, яка наводиться в довідниках, але й за відносною питомою термоЕРС відносно третьої речовини. Довідковими даними

щодо абсолютної питомої термоЕРС потрібно користуватися таким чином. Якщо потрібно розрахувати значення питомої термоЕРС, наприклад, нікелю відносно міді (табл. 3.1), то потрібно від абсолютної питомої термоЕРС нікелю (-19,3) відняти абсолютну питому термоЕРС міді (+1,8), отримавши  $\psi_{12} = (-19,3) - (+1,8) = -21,1$  (мкВ/К).

Ефект Зеебека, який був відкритий у 1826 році, часто використовують для контролю температури за допомогою так званої термопари – спеціально підібраних та ізольованих між собою пар металевих провідів. За допомогою термопари можна визначити температуру  $T_2$  другого спаю, вимірюючи напругу  $U$  та знаючи коефіцієнт Зеебека  $\psi_{12}$  і температуру  $T_1$  (3.6). Термопари використовуються також для підвищення безпеки використання побутових газових плит – для автоматичного вимикання газового клапана у разі неконтрольованого гасіння полум'я газової горілки, яке супроводжується зникненням термоЕРС і електричного струму в термопарі.

Ефект Зеебека використовують також для прямого (безмашинного) перетворення теплової енергії в електричну за допомогою термоелектричних генераторів. Для постійної роботи термоелектричного генератора під навантаженням  $R$  необхідно забезпечити хороший тепловий контакт спаїв провідників першого 1 і другого 2 видів з двома середовищами, де має місце достатня різниця температур  $T_1-T_2$  (рис. 3.8).



**Рисунок 3.8 – Схема термоелектричного генератора**

Для підведення тепла до гарячих спаїв і підтримання необхідної різниці температур  $T_1-T_2$  використовуються різноманітні джерела тепла – сонячні концентратори, органічне паливо, радіоактивні ізотопи і навіть ядерні реактори.

Ефект Зеебека як природне явище може проявлятися в планетарних масштабах. Температурна та структурна неоднорідність Землі

згідно з цим ефектом спричиняє термоЕРС та відповідний електричний струм в Землі. Саме цей струм і стає причиною створення захисного магнітного поля Землі, яке відхиляє силою Лоренца потік швидких і високоенергетично заряджених частинок Сонця (сонячного вітру швидкістю 300...1200 км/с) при їх наближенні до земної атмосфери, і таким чином зберігає повітря, воду і життя на Землі.

**Електротермічний ефект Пельтьє** – це явище виділення або поглинання тепла контактами двох різних провідників чи напівпровідників при проходженні через них постійного електричного струму. Ефект Пельтьє був відкритий у 1834 році. Це явище зворотне явищу виникнення термоелектрорушійної сили (ефект Пельтьє зворотний ефекту Зеєбека). Тому дію ефекту Пельтьє можна розглядати так само, як і ефект у Зеєбека (рис. 3.7 і 3.8) з тою лише відмінністю, що електрична енергія не отримується від термоелементів, а навпаки, підводиться до них від джерела.

Ефект Пельтьє можна пояснити існуванням різниці потенціалів на контакті двох різних провідників чи напівпровідників, тобто електричного контактного поля (3.5). Якщо електричний струм протікає проти напрямку дії контактного поля, то зовнішнє джерело струму має витратити додаткову енергію. Ця енергія буде витрачена на нагрівання контакту. Якщо ж електричний струм протікає за напрямом дії контактного поля, то це поле підтримує електричний струм, тобто виконує роботу на переміщення зарядів. Необхідна для цього енергія буде відбиратись від провідника і надходити на контакт. Таким чином, електричний струм переносить тепло з одного боку елемента Пельтьє на протилежний бік, створюючи різницю температур.

Кількість теплоти  $Q$ , яка виділяється чи поглинається контактом при проходженні струму  $I$ , пропорційна величині струму та часу  $t$  його протікання:

$$Q = P \cdot I \cdot t, \quad (3.9)$$

де  $P = \psi T$  – коефіцієнт Пельтьє, який простіше розрахувати за допомогою коефіцієнта  $\psi$  термоелектрорушійної сили (3.6) згідно з другим співвідношенням Томсона (3.12).

Ефект Пельтьє більш помітний у напівпровідниках і тому частіше використовується в напівпровідникових елементах (в елементах Пельтьє). Незважаючи на невеликий коефіцієнт корисної дії, елементи Пельтьє, завдяки відсутності додаткових рухомих механізмів, широко використовуються для охолодження морозильних камер холодильників, інфрачервоних сенсорів, діодних лазерів та різноманітних електронних і комп'ютерних пристроїв. Прикладом підвищення ефективності використання елементів Пельтьє є поєднання холодильника та електричної плити в єдиному пристрої, де холодні контакти розміщують у морозильній камері, а гарячі контакти – поряд з нагрівальними елементами електроплити. Елементи Пельтьє складаються з декількох пар напівпровідникових паралелепіпедів з електронною ( $n$ ) і електронно-дірковою ( $p$ ) електропровідністю – зазвичай з телуриду вісмуту  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  та сполучень германію з кремнієм.

**Електротермічний ефект Томсона** – це явище виділення або поглинання тепла при проходженні електричного струму через неоднорідно нагрітий провідник. Якщо уздовж провідника з електричним струмом  $I$  виникає різниця температур ( $\Delta T = T_1 - T_2$ ), то крім теплової енергії Джоуля  $W = I^2 R t$  (1.10) в об'ємі провідника протягом деякого часу  $t$  виділиться або поглинається додаткова кількість теплоти  $Q_T$ , яка називається теплотою Томсона:

$$Q_T = \sigma \cdot I \cdot \Delta T \cdot t, \quad (3.10)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт Томсона, який залежить від природи провідника.

У диференціальній формі кількість тепла  $dQ_T$ , що виділяється протягом часу  $dt$  на відрізок  $dx$  провідника об'ємом  $dV$ , визначається як:

$$dQ_T = -\sigma \cdot \nabla T \cdot J \cdot dt \cdot dV, \quad (3.11)$$

де  $\nabla T = \frac{dT}{dx}$  – градієнт температури провідника вздовж його довжини  $dx$ ;

$J = \frac{dl}{dS}$  – густина електричного струму;

$dV = dS \cdot dx$  – елементарний об'єм провідника.



При проходженні носіїв заряду (електронів провідності) через деякий відрізок неоднорідно нагрітого провідника чи напівпровідника, наприклад, із області високої температури  $T_1$  з більшою енергією електронів в область низької температури  $T_2$  ( $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$ ) електрони передають надлишкову енергію і додатково нагрівають цей відрізок. При зворотному напрямку переміщення електронів з області низької температури  $T_2$  в область високої температури  $T_1$  електрони поповнюють свою енергію за рахунок навколишніх атомів і тому охолоджують цей відрізок провідника.

Явище Томсона було відкрите в 1856 році. Воно за своєю природою є абсолютним явищем, тому що не потребує контактів різних матеріалів (на відміну від інших електротермічних явищ). Це дозволило Томсону на основі першого і другого законів термодинаміки зв'язати між собою три електротермічні ефекти (зв'язати коефіцієнти Зеєбека  $\psi$ , Пельтьє  $\Pi$  і Томсона  $\sigma$ ) і ввести абсолютну систему відліку питомої термоелектрорушійної сили  $\psi$  (табл. 3.1) для кожного провідника чи напівпровідника окремо:

$$\sigma = T \frac{d\psi}{dT}; \Pi = T \cdot \psi = \int_0^T \frac{\sigma}{T} dT, \quad (3.12)$$

де  $T$  – абсолютна температура провідника чи напівпровідника в місці контакту, К.

Ефект Томсона у порівнянні з ефектом Пельтьє і законом Джоуля проявляється в незначній мірі через відносно невеликі значення коефіцієнта Томсона  $\sigma$  в звичайних умовах. Наприклад, для вісмуту при кімнатній температурі коефіцієнт  $\sigma$  сягає лише  $\sim 10^{-5}$  В/К. Тому вплив ефекту Томсона враховують лише при підвищених вимогах до точності вимірів чи розрахунків.

### **3.1.5 Блукаючі струми**

Блукаючими струмами зазвичай називають ті струми, які виникають у землі. Серед причин цих струмів розглянемо лише ті, які виникають внаслідок електричного контакту з нею металевих провідників з електричним струмом і пов'язані з діяльністю людини.

**Блукаючі струми** обумовлені електричним контактом із землею провідників з електричним струмом. Контакт провідників із землею допускають зазвичай тоді, коли це потрібно з міркувань безпеки експлуатації електричного обладнання – для захисного заземлення електричного обладнання і зрівняння електричного потенціалу зовнішнього його корпусу з електричним потенціалом землі. Це заземлення має бути достатньо надійним (з мінімально можливим перехідним опором) для виключення випадкового враження людини електричним струмом. Виникаючі в таких випадках блукаючі струми є безумовно корисними, тому що завдяки цим струмам вирівнюються потенціали корпусу і землі. Доволі розповсюдженим джерелом блукаючих струмів є рейковий електротранспорт, в якому рейкові колії використовуються як провідники електричного струму і при цьому знаходяться в безпосередньому електричному контакті із землею. При протіканні електричного струму  $I$  в рейковій колії, яка має електричний опір  $R_p$ , виникає падіння напруги  $\Delta U = I_p \cdot R_p$  відповідно до закону Ома (1.9). У свою чергу, рейкова колія завдяки наявності в ній падіння напруги  $\Delta U$  є джерелом блукаючих струмів  $I_{bl}$  в землі.

**Найбільш негативні наслідки блукаючих струмів** мають місце на рейковому (залізничному) електротранспорті, де використовується постійний чи випрямлений струм. Під впливом цих струмів суттєво прискорюється електрохімічна корозія тих ділянок наземних та підземних металевих конструкцій, які знаходяться у вологому ґрунті і з яких виходять блукаючі струми  $I_{bl}$ . Такі ділянки називаються анодними зонами. Справа в тому, що у вологому ґрунті, як і в електроліті, носіями електричних зарядів є не тільки негативні електрони, але й позитивні іони. Іони до того ж є носіями речовини, що входить до складу згаданих металевих конструкцій. Тому участь іонів у блукаючих струмах означає поступове переміщення речовини в анодних зонах металоконструкцій в землю, тобто їх прискорену корозію і руйнування та суттєве скорочення терміну їх експлуатації. До найбільш дорогих і важливих промислових об'єктів, які підпадають під негативний вплив блукаючих струмів, відносяться тунелі, магістральні металеві трубопроводи, рейки та опори на залізниці, кабельні лінії електропостачання, підземні споруди великих міст. Блукаючі струми здатні також створювати

різницю електричних потенціалів між окремими частинами металевих конструкцій в будь-яких місцях, у тому числі у досить віддалених від рейкового електротранспорту місцях, і викликати вибухонебезпечне іскріння при випадковому замиканні і розмиканні цих частин. У таких місцях можуть виявитися вибуховий газ, бензин, нафта, вугільний і текстильний пил, вибухівка та інші горючі і вибухонебезпечні речовини. Тому на газових, нафтопереробних, вугільних, хімічних та інших подібних вибухонебезпечних підприємствах потрібно не тільки знижувати середньорічний рівень блукаючих струмів, але й не допускати небезпечні потенціали блукаючих струмів у будь-яку мить.

**Обмеження блукаючих струмів та їх потенціалів.** Найбільш дієвими є активні методи обмеження блукаючих струмів, в яких передбачається використання додаткових регульованих джерел постійного струму з метою компенсації падіння напруги на окремих ділянках залізничного шляху або в додаткових паралельних кабелях. Для захисту тунелів як найбільш важливих споруд від корозійного впливу блукаючих струмів використовується так званий тунельний захист. У ньому передбачене приєднання шляху джерел струму в електричний розрив залізничного шляху згідно зі струмом на ділянці тунелю. Для захисту всіх ділянок рейкового шляху і зниження блукаючих струмів та їх електричних потенціалів до безпечного рівня використовується додатковий електричний кабель, який з'єднує ці ділянки з "мінусом" тягової підстанції через додаткові регульовані джерела струму.

## **3.2 Метали високої електропровідності**

### **3.2.1 Мідь та її сплави**

**Мідь *Cu*** отримують шляхом переробки сульфідних руд. За електропровідністю мідь поступається лише сріблу (табл. 3.1). Мідь має високу механічну міцність і корозійну стійкість, легко витягується у дріт малого діаметра, добре піддається паянню. Мідь частіше використовують у м'якому стані, який отримують після відпалу при температурі +270 °С з подальшим охолодженням. М'яка мідь має на 3...5 % більшу електропровідність, ніж тверда. Стандартна мідь у відпаленому стані

має питомий опір  $\rho = 0,017241$  мкОм·м. Домішки суттєво знижують електропровідність міді. Тому для використання в електротехніці її обов'язково піддають електролітичному очищенню. Мідь марки М1 має домішок не більше 0,1 %, а марки М0 - не більше 0,05 %. Найчистішою є мідь марки М006, яка має не більше 0,01 % домішок і виплавляється у вакуумних індукційних печах.

Для отримання спеціальних або додаткових властивостей використовують різноманітні мідні сплави. Серед цих сплавів найбільш відомими і поширеними у використанні є бронза і латунь.

**Бронза** – це сплав міді з домішками в невеликій їх кількості. Як домішки можуть використовуватись олово Sn, фосфор P, цинк Zn, свинець Pb, нікель Ni, алюміній Al, марганець Mn, залізо Fe, берилій Be, титан Ti, кремній Si, магній Mg, кадмій Cd. Бронзи маркуються як Бр, після чого вказують букви і цифри, які означають легуючі елементи та їх вміст у процентах. Берилієва бронза БрБ2 ( $\text{CuBe}_2$ ) містить 2 % берилію, з неї виготовляють мембрани пружних контактів в електричних пристроях. Кадмієва бронза БрКд1 ( $\text{CuCd}_1$ ) містить 1 % кадмію, з неї виготовляють контактні проводи для електротранспорту та колекторних пластин. Фосфориста бронза БрОФ6,5-0,15 ( $\text{CuSnP}_{6,5-0,15}$ ) містить 6,5 % олова і 0,15 % фосфору, використовується для виготовлення струмопровідних пружин в електроприладах.

**Латунь** – це мідний сплав, в якому основним легуючим елементом є цинк Zn в кількості до 45 %. Вона значно пластичніше і дешевше міді, і тому широко використовується в електротехніці для виготовлення струмопровідних деталей методом штамповки. В деяких марках латуні для поліпшення окремих властивостей вводять у невеликій кількості інші елементи – олово, свинець, марганець, нікель або алюміній. Маркують латуні буквою Л і цифрою, яка вказує процентний вміст міді. Наприклад, латунь марки Л63 містить 63 % міді, а решта – цинк. До речі, латунь цієї марки має максимальну пластичність. У латуней складного вмісту в маркуванні вказується легуючий елемент. Наприклад, латунь марки ЛС59-1 містить 59 % міді, 1 % свинцю, а решта – цинк.

### **3.2.2 Алюміній та його сплави**

За електропровідністю алюміній займає третє місце після срібла і міді – лише в 1,53 рази гірше міді (табл. 3.1), а за густиною – перше місце (в 3,3 рази легший за мідь). Алюмінієвий провідник вдвічі легше мідного з таким самим опором. Тому алюміній має суттєві переваги над іншими провідниковими матеріалами, особливо, якщо врахувати відносно невелику вартість алюмінію. Невисокі механічні властивості алюмінію інколи компенсують за допомогою додаткових сталевих провідників. Зокрема, у високовольтних лініях електропередачі використовують сталеалюмінієві провідники.

Алюміній отримують шляхом розчинення чистого глинозему  $Al_2O_3$  в розплавленому кріоліті і при температурі  $\sim 950^\circ C$  методом електролізу виділяють з нього алюміній. Первинне очищення алюмінію продуванням через його розплав хлору дозволяє знизити кількість домішок в алюмінію до 0,3 %. Подальше зниження домішок до 0,01 % можливе при електролітичному рафінуванні алюмінію. Технічно чистий алюміній марок А85, А8, А7, А6, А5 і А0 містить алюмінію не менше 99,85 %, 99,8 %, 99,7 %, 99,6 %, 99,5 % і 99,0 % відповідно. Хімічно чистий алюміній марки А995, А99, А97 і А95 містить алюмінію не менше 99,995 %, 99,99 %, 99,97 % і 99,95 % відповідно. Особливо чистий алюміній марки А999 містить алюмінію не менше 99,999 %. Для напівпровідникової техніки за методом зонної плавки виготовляють надчистий алюміній з чистотою 99,9999 % (до 0,0001 % домішок). Особливо чистий і надчистий алюміній використовують як кріопровідник з дуже малим питомим опором. Наприклад, при  $20^\circ K$  його питомий опір знижується в 2000...6000 разів [5].

Алюміній – дуже активний метал, який швидко окислюється на повітрі та покривається тонкою і щільною окисною плівкою  $Al_2O_3$ . Ця плівка у звичайних умовах захищає внутрішні шари алюмінію від подальшого окислення (корозії) і навіть може виконувати електроізоляційні функції. У разі порушення цієї плівки, наприклад, під впливом електричної дуги при розмиканні провідника, процес окислення алюмінію енергетично підтримує горіння дуги. Тому алюміній забороняється використовувати в умовах небезпеки пожежі або вибуху. Здатність алюмінію до активного окислення та сильного нагріву

використовують у металургії у вигляді залізо-алюмінієвого терміту – порошковидної суміші алюмінію (25 %) і оксиду заліза  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (75 %).

Алюміній має негативну абсолютну питому термоелектрорушійну силу (табл. 3.1). Тому алюмінієвий дріт у контакті з мідним чи сталевим створює гальванічну пару. В цій парі алюміній є анодом і тому в присутності вологи схильний до прискореної електрохімічної корозії, особливо за наявності електричного струму.

Серед електротехнічних алюмінієвих сплавів найбільш відомим є альдрей, який крім алюмінію містить магній Mg (0,3...0,5 %), кремній Si (0,4...0,7 %) і залізо Fe (0,2...0,3 %). Цей сплав за електропровідністю майже не поступається чистому алюмінію, а за механічними властивостями наближається до міді [5].

### 3.3 Надпровідники

Надпровідники відрізняються від звичайних електричних провідників нульовим питомим опором при низьких (криогенних) температурах. Надпровідність відкрив голландський вчений Каммерлінг-Оннес у 1911 році.

#### 3.3.1 Надпровідність

Надпровідність – явище переходу деяких провідників електричного струму зі звичайного стану в стан надпровідності при дуже низькій температурі  $T < T_k$  і магнітній індукції  $B < B_k$ , де  $T_k$  і  $B_k$  називаються критичною температурою і критичною магнітною індукцією. Провідникові матеріали з такою властивістю називають надпровідниками. Їх питомий електричний опір у надпровідному стані має надзвичайно мале значення  $\rho < 5 \cdot 10^{-24}$  Ом·м, яке не піддається вимірюванню, і тому вважається нульовим. Стан надпровідності зникає, якщо температура  $T$  надпровідника або якщо магнітна індукція на його поверхні  $B$  перевищить критичне значення ( $T > T_k$  або  $B > B_k$ ).

Температура надпровідника  $T$  не залежить від електричного струму  $I$  в ньому через нульове значення питомого опору  $\rho$  (1.10). Тому умова існування надпровідності ( $T < T_k$ ) не обмежує електричний струм.

Але магнітна індукція  $B$  на поверхні надпровідника є наслідком електричного струму в ньому (див. підрозділ 1.2.3.1), і тому друга умова існування надпровідності ( $B < B_k$ ) обмежує електричний струм. Зв'язок магнітної індукції  $B$  на поверхні надпровідника зі струмом  $I$  в ньому можна встановити, користуючись формулами (1.20) і (1.21):

$$B = \mu_a \cdot H = \frac{\mu_a}{\pi D} I = \frac{\mu_a D}{4} J, \quad (3.13)$$

де  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність надпровідника на його поверхні, яка може бути прирівняна до  $\mu_0$  (до абсолютної магнітної проникності вакууму  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);

$H$  – напруженість магнітного поля на поверхні надпровідника, А/м;

$I$  – електричний струм у надпровіднику, А;

$D$  – діаметр надпровідника, м;

$J = \frac{I}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}$  – середня густина струму в надпровіднику, А/м<sup>2</sup>.

### **3.3.2 Ефект Мейснера**

З формули (3.13) видно, як умову існування надпровідності можна використовувати не тільки обмеження за магнітною індукцією на поверхні надпровідника ( $B < B_k$ ), але й обмеження за напруженістю магнітного поля ( $H < H_k$ ). Використання ж густини  $J$  електричного струму для визначення умов існування надпровідності ( $J < J_k$ ) не зовсім коректне з двох причин. По-перше, магнітна індукція  $B$  як фундаментальний фактор надпровідності залежить не тільки від густини  $J$  електричного струму, але й від геометричних параметрів (3.14). По-друге, густина електричного струму в надпровіднику розподіляється надзвичайно нерівномірно через прояв ефекту Мейснера.

Ефект Мейснера – це витіснення магнітного поля у поверхневий і дуже тонкий шар надпровідника. У цьому ефекті полягає друга фундаментальна відмінність надпровідників від звичайних провідників електричного струму. Товщина цього шару згідно з дослідженнями німецьких фізиків Фріца і Гайнца Лондонів складає близько  $10^{-2}$  мкм. При цьому не має принципового значення, які електричні струми

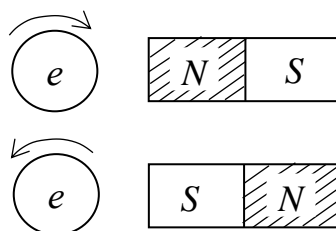
спричинили магнітне поле – зовнішні чи внутрішні струми надпровідника. Це означає, що електричний струм надпровідника як першопричина магнітного поля відповідно до закону повного струму (1.19) також витісняється у поверхневий і дуже тонкий шар надпровідника. Ця особливість змушує, як надпровідники, використовувати кабелі з великою кількістю тонких надпровідних жил або плівок, які розміщують у його зовнішньому тонкому шарі.

Умови існування ефекту Мейснера співпадають з умовами існування надпровідності, якщо використовується надпровідник першого роду і не співпадають, якщо використовується надпровідник другого роду.

### **3.3.3 Природа надпровідності**

Найбільш визнаною теорією, яка на мікроскопічному рівні пояснює фізичну природу надпровідності, вважається так звана БКШ-теорія – квантова теорія надпровідності американських вчених Бардіна, Купера і Шріффера. Нажаль, ця теорія не здатна повністю пояснити всі явища, які пов’язані з надпровідністю. Особливо це стосується пояснення глибинних причин високотемпературної надпровідності. Тому вчені різних країн, враховуючи перспективи практичного використання надпровідності, постійно та інтенсивно працюють над удосконаленням теорії надпровідності.

В основі БКШ-теорії лежить уявлення, що електрони провідності з антипаралельними спінами (з протилежними напрямками обертання електронів навколо своїх осей) можуть об’єднуватися в так звані куперівські пари. Їх можна уявити як пари мініатюрних магнітів з протилежними магнітними полюсами, які через посередництво кристалічних решіток взаємно притягуються із силою, що перевищує кулонівську силу взаємного відштовхування (рис. 3.9).



**Рисунок 3.9 – Картина куперівських електронних пар**



Куперівські пари мають сумарний нульовий спін, і тому здатні безперешкодно (без електричного опору) переміщуватись у надпровіднику. Надпровідність зникає, якщо куперівські пари роз'єднуються під дією силового впливу броунівського руху мікрочастинок (при надмірному підвищенні температури), магнітного поля (при надмірному підвищенні магнітної індукції), а також під впливом високої частоти електромагнітного поля.

Строго кажучи, опір надпровідника при змінному струмі дещо відмінний від нуля і збільшується по мірі зростання його частоти. Це пояснюється наявністю серед надпровідних електронів (куперівських електронних пар) незначної кількості звичайних електронів, які беруть участь у створенні змінного електричного струму, і тому спричиняють деякі теплові (джоулеві) втрати. Цей ефект особливо яскраво проявляється при частоті електромагнітного поля  $f > 3 \cdot 10^{11}$  Гц, коли енергії квантів електромагнітного поля  $h \cdot f$  стає достатньою для роз'єднання куперівських пар, де  $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постійна Планка або квант дії. Ця частота є початковою в діапазоні інфрачервоних променів. Тому надпровідники у світловому діапазоні частот електромагнітних хвиль нічим не відрізняються від звичайних провідників.

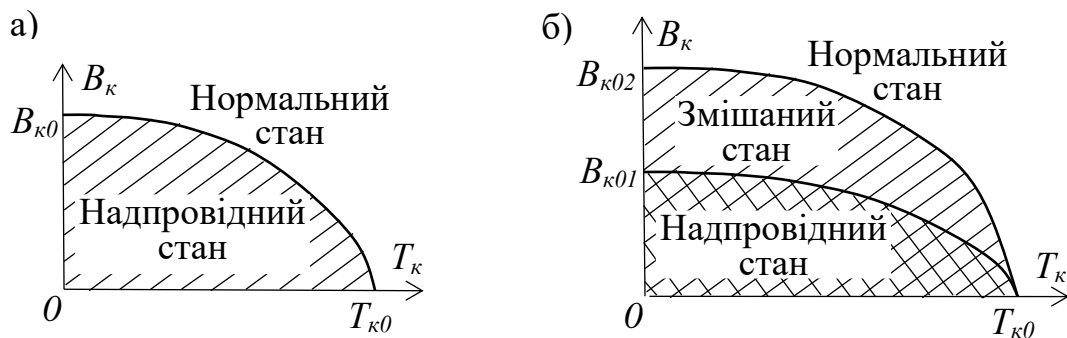
Залежно від поведінки надпровідників у магнітному полі розрізняють дві основні їх групи – надпровідники першого і другого роду.

### **3.3.4 Надпровідники першого роду**

Надпровідники першого роду мають такі характерні особливості (рис. 3.10, *a*): існування однієї зони надпровідного стану з одним значенням критичної магнітної індукції  $B_{k0}$  при  $T_k \approx 0$ ; перехід з нормального стану у надпровідний відбувається стрибкоподібно; повне витіснення зовнішнього магнітного поля з об'єму надпровідника в стані надпровідності (ефект Мейснера).

Надпровідники першого роду за давньою традицією інколи називають “м'якими” надпровідниками. До надпровідників першого роду відносяться деякі чисті (елементарні) метали [5]:

- титан Ti ( $T_{k0} = 0,39$  К;  $B_{k0} = 0,006$  Тл);
- кадмій Cd ( $T_{k0} = 0,52$  К;  $B_{k0} = 0,0028$  Тл);
- цинк Zn ( $T_{k0} = 0,85$  К;  $B_{k0} = 0,0055$  Тл);



**Рисунок 3.10 – Діаграми зміни стану надпровідників першого (а) і другого роду (б)**

- галій Ga ( $T_{k0}=1,08$  К;  $B_{k0}=0,0059$  Тл);
- алюміній Al ( $T_{k0}=1,2$  К;  $B_{k0}=0,01$  Тл);
- талій Tl ( $T_{k0}=2,37$  К;  $B_{k0}=0,018$  Тл);
- індій In ( $T_{k0}=3,41$  К;  $B_{k0}=0,028$  Тл);
- олово Sn ( $T_{k0}=3,7$  К;  $B_{k0}=0,031$  Тл);
- ртуть Hg ( $T_{k0}=4,2$  К;  $B_{k0}=0,046$  Тл);
- тантал Ta ( $T_{k0}=4,5$  К;  $B_{k0}=0,083$  Тл);
- свинець Pb ( $T_{k0}=7,2$  К;  $B_{k0}=0,08$  Тл).

При таких малих критичних значеннях температури  $T_{k0}$  і магнітної індукції  $B_{k0}$  надпровідники першого роду не викликають практичного інтересу.

### **3.3.5 Надпровідники другого роду**

Надпровідники другого роду мають такі характерні особливості (рис. 3.10, б): окрім звичайної для надпровідників першого роду зони надпровідного стану існує зона змішаного надпровідного стану з двома значеннями критичної магнітної індукції –  $B_{k01}$  і  $B_{k02}$ ; перехід з нормального стану у надпровідний відбувається не стрибкоподібно, а поступово в деякому інтервалі температур; ефект Мейснера спостерігається в повній мірі лише в зоні надпровідного стану, а в зоні змішаного стану – лише частково. Змішаний стан за питомим опором  $\rho$  не відрізняється від надпровідного, тобто  $\rho=0$ .

Серед чистих металів до надпровідників другого роду відносяться лише ніобій Nb ( $T_{k0}=9,22$  К;  $B_{k02}=0,195$  Тл), ванадій V ( $T_{k0}=5,43$  К;  $B_{k02}=0,137$  Тл) і технецій Tc ( $T_{k0}=7,8$  К;  $B_{k02}=0,141$  Тл). Інші

надпровідники другого роду – це сплави і різноманітні хімічні сполуки. Їх зазвичай піддають пластичному деформуванню в холодному стані з метою підвищення концентрації дефектів у кристалічних решітках та критичної магнітної індукції  $B_k$  [6]. Такі надпровідники інколи називають “твердими”.

До “твердих” надпровідників відносяться: а) сплави ніобію Nb і титану Ti ( $T_{k0}=10$  К;  $B_{k02}=12$  Тл); ніобію Nb і цирконію Zr ( $T_{k0}=9,5$  К;  $B_{k02}=11$  Тл); ванадію V і галію Ga ( $T_{k0}=14,2$  К;  $B_{k02}=22,6$  Тл); ніобію Nb, алюмінію Al і германію Ge ( $T_{k0}=21$  К;  $B_{k02}=41$  Тл); б) хімічні сполуки ніобію Nb з азотом N; ніобію з германієм Nb<sub>3</sub>Ge ( $T_{k0}=23,2$  К;  $B_{k02}=22,6$  Тл); ніобію з оловом Nb<sub>3</sub>Sn ( $T_{k0}=18$  К;  $B_{k02}=22$  Тл); свинцю з молібденом і сіркою Pb<sub>1</sub>Mo<sub>5,1</sub>S<sub>6</sub> ( $T_{k0}=14,4$  К;  $B_{k02}=60$  Тл).

Принципово новими стали керамічні високотемпературні надпровідники (ВТНП) на основі оксиду міді з критичною температурою  $T_k$  вище 30 К. Такі надпровідники вперше отримали в 1986 році швейцарські вчені К.Мюллер і Дж. Беднорц. До керамічних ВТНП відносяться лантанова кераміка – з’єднання лантану La зі стронцієм Sr, міддю Cu і киснем O ( $T_k=56$  К) або з барієм, міддю і киснем La<sub>1,8</sub>Ba<sub>0,2</sub>CuO ( $T_k=85$  К); ітрієва кераміка – з’єднання ітрію з барієм, міддю і киснем YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> ( $T_{k0}=90$  К;  $B_{k02}=100$  Тл); вісмутова кераміка – з’єднання вісмуту зі стронцієм, кальцієм, міддю і киснем Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> ( $T_k=95$  К); талієва кераміка – з’єднання талію з барієм, кальцієм, міддю і киснем Tl<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> ( $T_k=110$  К); ртутна кераміка – з’єднання ртуті з барієм, кальцієм, міддю і киснем HgBa<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> ( $T_k=125$  К). Головною перевагою керамічних ВТНП є можливість їх охолодження відносно дешевим зрідженим азотом. Це відкриває шлях для широкого використання надпровідників у промисловості.

### **3.4 Метали високого електричного опору**

#### **3.4.1 Резистивні сплави**

Резистивні сплави використовуються для виготовлення вимірвальних приладів та зразкових резисторів. Тому ці сплави повинні мати не тільки великий питомий електричний опір  $\rho$ , але й високу стабільність  $\rho$  – незначний температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_\rho$ .

**Манганін** – найбільш типовий сплав для виготовлення зразкових резисторів. Він містить мідь Cu (85 %), марганець Mn (12 %) і нікель Ni (3 %) [10]. Його основні електричні властивості: достатньо високий питомий опір  $\rho=0,42...0,48$  мкОм·м, досить мале значення температурного коефіцієнта питомого опору  $\alpha_\rho=(6...50) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  і доволі малий коефіцієнт термоелектрорушійної сили в парі з міддю  $\psi_{12}=1...2$  мкВ/К (див. підрозділ 3.1.4.3). Для отримання малого значення коефіцієнта  $\alpha_\rho$  провід з манганіну піддається спеціальній термообробці – відпалу у вакуумі при температурі +550...600°C. Гранична робоча температура манганіну +200°C.

**Константан** – сплав, який містить мідь Cu (58,5 %), нікель Ni (40 %) і марганець Mn (1,5 %) [10]. Його середній температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_\rho=(-5...-50) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  при  $\rho=0,48...0,52$  мкОм·м (рис. 3.3). Гранична робоча температура константану +450°C. З константану також виготовляють тензочутливі датчики для вимірювання механічних зусиль та деформацій металевих конструкцій. Як недолік константану у порівнянні з манганіном слід відзначити доволі великий коефіцієнт термоелектрорушійної сили в парі з міддю  $\psi_{12}=45...55$  мкВ/К, що може позначитися на точності вимірювань (особливо при використанні вимірювальних мостів). Крім цього, константан містить багато відносно дорогого нікелю.

### **3.4.2 Сплави для електронагрівальних елементів**

Сплави для електронагрівальних елементів мають бути достатньо дешевими і працювати, контактуючи з повітрям при досить високих температурах – інколи до 1000°C. Таким вимогам відповідають різноманітні сплави на основі заліза. Висока теплостійкість таких сплавів пояснюється утворенням суцільної плівки завдяки введенню до їх складу нікелю Ni, хрому Cr і алюмінію Al. Термін служби нагрівальних елементів може суттєво збільшитись при виключенні доступу кисню до поверхні нагрівального проводу. Для цього провід розміщують у середині трубки із стійкого до окислення металу і заповнюють трубку діелектриком з високою теплопровідністю (магнезією MgO). Найбільш вживаними серед сплавів на основі заліза є *ніхром* і *хромаль*.

**Ніхром** – сплав заліза з нікелем Ni (55...78 %), хромом Cr (15...23 %) і марганцем Mn (1,5 %). Основні електричні властивості ніхрому: питомий опір  $\rho=1...1,2$  мкОм·м, температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_\rho=(1...2)\cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>, гранична робоча температура 1000...1100°C. Ніхром може легко витягуватись у відносно тонкий провід або стрічку. Головний недолік ніхрому – великий вміст дорогого нікелю. Якщо вміст нікелю зменшити за рахунок збільшення заліза, то гранична робоча температура і термін служби сплаву знижується. Такий сплав називається фероніхромом.

**Хромаль** – сплав заліза з хромом Cr (12...27 %), алюмінієм Al (3,5...6,5 %) і марганцем Mn (0,7 %) з деяким вмістом кремнію Si (0,6...1,2 %) і вуглецю С (0,6...0,15 %). Основні електричні властивості хромалю: питомий опір  $\rho=1,26...1,4$  мкОм·м, температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_\rho=(0,5...1,5)\cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>, гранична робоча температура 750...1400°C. Хромаль значно дешевше ніхрому, однак через твердість і хрупкість з нього важко виготовляти тонкі проводи чи стрічки. Якщо вміст хрому зменшити за рахунок збільшення заліза, то гранична робоча температура і термін служби сплаву знижується. Такий сплав називається фехралем.

### 3.5 Метали різного призначення

#### 3.5.1 Тугоплавкі метали

**Вольфрам W** – дуже щільний ( $d=19,3$  г/см<sup>3</sup>) і тугоплавкий ( $T_{\text{плавл}}=3400^\circ\text{C}$ ) метал. Проміжним продуктом його виробництва з вольфраміту  $\text{FeWO}_4+\text{MnWO}_4$  і шеєліту  $\text{CaWO}_4$  є вольфрамова кислота  $\text{H}_2\text{WO}_4$ , з якої вилучають водень при  $+900^\circ\text{C}$  і отримують дрібний порошок вольфраму. З цього порошку методами порошкової металургії при тиску до 200 МПа пресують і спікають вольфрамові стрижні. З них після складної термічної і механічної обробки у водневій атмосфері отримують дріт діаметром до 0,01 мм. Завдяки високій тугоплавкості ці вироби можуть працювати при температурі до  $+2300^\circ\text{C}$  без доступу кисню (у вакуумі або в атмосфері інертного газу). Питомий

електричний опір вольфраму  $\rho$  суттєво залежить від температури – збільшується приблизно за лінійним законом від 0,055 мкОм·м при 20°C до 1,05 мкОм·м при 3000°C. Завдяки цій властивості вольфрамові дроти інколи використовують як стабілізатор струму (як баретер). Вольфрам відносно дорогий, важко піддається обробці, і тому його використовують лише там, де потрібна дуже висока робоча температура і термоелектронна емісія – при виготовленні ниток накаливання освітлювальних і електронних ламп, у рентгенівських, електронно-променевих і газорозрядних трубках [6]. Для зниження роботи виходу і збільшення емісії електронів у вольфрам уводять 1...2 % оксиду торію ThO<sub>2</sub>. Вольфрам слабо схильний до утворення електричної дуги, тому він давно використовується для виготовлення розривних контактів.

**Тантал Ta** – тугоплавкий метал з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}}=3000^\circ\text{C}$ , має щільність  $d=16,6 \text{ г/см}^3$  і питомий опір  $\rho=0,124 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , краще, ніж вольфрам, піддається пластичному деформуванню, у тому числі при низькій температурі. Заготовки з танталу спікають методами порошкової металургії у вакуумі через його здатність поглинати інертні гази і ставати від цього дуже крихкими. Тантал отримують з мало розповсюджених танталатів методом електролізу. Тантал в основному використовують в електровакуумній промисловості для виготовлення анодів і сіток генераторних ламп, електролітичних конденсаторів, а також як надпровідник.

**Молібден Mo** – тугоплавкий метал з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}}=2620^\circ\text{C}$  з найнижчим питомим опором серед тугоплавких металів ( $\rho=0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ), має схожі з вольфрамом властивості при значно меншій щільності ( $d=10,2 \text{ г/см}^3$ ) і значно більшій пластичності. Починає окислюватися при 400°C, у вологій атмосфері – навіть при 250°C. Тому прилади з молібдену можуть працювати лише у вакуумі або в середовищі інертних газів. Молібден отримують з руди молібденіту MoS<sub>2</sub>. Завдяки високій міцності, твердості і пластичності молібден є одним з кращих матеріалів для виготовлення деталей складної конфігурації, що працюють в умовах високих температур. Молібден, як і вольфрам, використовують для виготовлення електродів радіоламп, а також розривних електричних контактів. У парі з вольфрамом молібден

використовується для виготовлення високотемпературних термопар, які здатні працювати при температурі до 2000 °С в інертних середовищах або вакуумі.

**Ніобій Nb** – тугоплавкий метал з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}}=2470^{\circ}\text{C}$  та питомим опором  $\rho=0,15$  мкОм·м, а також щільністю  $d=8,57$  г/см<sup>3</sup>. За хімічними властивостями і методами обробки ніобій подібний до танталу. Заготовки з ніобію також виготовляють методами порошкової металургії. Ніобій і деякі його сплави є надпровідниками з відносно високою критичною температурою (для чистого ніобію  $T_k=9,2$  К, а для сплавів  $T_k=23,2$  К). Тому його використовують для виготовлення надпровідних електромагнітів, а також в електровакуумній техніці.

### **3.5.2 Легкоплавкі метали**

**Свинець Pb** – дуже пластичний метал з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}}=327^{\circ}\text{C}$  і питомим опором  $\rho=0,19$  мкОм·м. У холодному стані він легко прокатується на фольгу. Свинець стійкий до корозії під дією води, сірчаної і соляної кислот, і тому використовується для виготовлення кабельних захисних оболонок, пластин свинцевих кислотних акумуляторів, плавких запобіжників. Свинець дуже ефективно поглинає рентгенівські та гама-промені (на порядок краще сталі і на два порядки краще цегли), і тому використовується в засобах захисту від цих променів. Водорозчинні сполуки свинцю отруйні.

**Олово Sn** – м'який і пластичний метал сріблястого кольору з низькою температурою плавлення ( $T_{\text{плавл}}=332^{\circ}\text{C}$ ) і відносно великим питомим опором ( $\rho=0,113$  мкОм·м), при згинанні характерно потріскує. Олово стійке до окислення при температурах до 150 °С і не піддається впливу води, що дозволяє використовувати його для захисного антикорозійного покриття металевих (сталевих) виробів. Олово у холодному стані легко прокатується на фольгу. Для полегшення прокатування в олово вводять присадки свинцю (до 15 %) і сурми (до 1 %). Тонку олов'яну фольгу використовують у виготовленні конденсаторів. Олово широко використовується у більшості м'яких (низькотемпературних) припоїв. Сплави на основі або з додаванням олова широко використовуються при виробництві напівпровідникових приладів з

кремнію, германію та арсеніду галію завдяки тому, що олово є майже єдиним носієм донорських елементів, особливо фосфору.

**Цинк Zn** – світлий метал, який отримують металургійним шляхом і очищають потім електролітичним способом. Він плавиться при  $T_{\text{плавл}} = 419^{\circ}\text{C}$ , має відносно низький питомий опір  $\rho = 0,0592$  мкОм·м, при нормальних температурах крихкий, але при нагріванні до  $100^{\circ}\text{C}$  стає пластичним. При подальшому нагріванні до  $200^{\circ}\text{C}$  цинк знову стає дуже крихким (навіть розтирається у порошок). Цинк добре кується і прокатується в тонкі листи. На повітрі покривається тонкою захисною оксидною плівкою ZnO, а в присутності вологи і вуглекислого газу – плівкою карбонат-гідроксиду цинку  $\text{Zn}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ . Завдяки цій властивості цинк застосовують як антикорозійне покриття металевих (сталевих) виробів. Цинк використовується також для металізації паперу конденсаторів шляхом нанесення на папір парів цинку у вакуумі, який випаровується при температурі близько  $600^{\circ}\text{C}$ .

**Кадмій Cd** – ковкий і тягучий метал сріблясто-білого кольору з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}}=321^{\circ}\text{C}$  і питомим опором  $\rho=0,074$  мкОм·м. В атмосфері вологого повітря вкривається тонкою плівкою окису, яка захищає метал від подальшої корозії. Кадмій застосовують у виробництві лужних кадмієво-нікелевих акумуляторів і як захисне (антикорозійне) покриття, входить до складу деяких видів бронзи і низькотемпературних припоїв. Розчинні сполуки кадмію отруйні.

**Ртуть Hg** – єдиний метал, який при нормальних температурах знаходиться в рідкому стані ( $T_{\text{плавл}}=-39^{\circ}\text{C}$ ). Ртуть має доволі великий питомий опір  $\rho=0,958$  мкОм·м. Вона використовується в газорозрядних лампах завдяки низькому потенціалу іонізації у порівнянні зі звичайними і навіть інертними газами. У ртуті розчиняються багато металів (золото, срібло, платина, магній, алюміній, цинк, олово, свинець, кадмій), утворюючи амальгами. У ртуті не розчиняються вольфрам, залізо і тантал. Ртуть, її сполуки і особливо пара – отруйні.

### **3.5.3 Благородні метали**

В електротехніці до благородних металів належать *золото Au, срібло Ag, платина Pt і паладій Pd*. Ці метали та їх сплави мають високу хімічну стійкість.



**Золото Au** має дуже високу пластичність (можна отримати фольгу товщиною до 0,01 мкм), з кислотами і лугами не взаємодіє, розчиняється лише в суміші азотної і соляної кислот (в “царській горілиці”), плавиться при  $T_{\text{плавл}}=1063^{\circ}\text{C}$ , має питомий опір  $\rho=0,0225$  мкОм·м. В електронній техніці золото використовується при виготовленні напівпровідникових фоторезисторів та фотоелементів, прецизійних контактних елементів у особливо відповідальних випадках. У менш відповідальних випадках застосовують сплави золота зі сріблом, нікелем і цирконієм, які мають підвищену твердість.

**Срібло Ag** – білий блискучий пластичний метал з рекордною електропровідністю ( $\rho=0,015$  мкОм·м), плавиться при  $T_{\text{плавл}}=961^{\circ}\text{C}$ , легко піддається механічній обробці, при температурі вище  $200^{\circ}\text{C}$  починає окислюватися з утворенням  $\text{AgO}_2$  і  $\text{AgO}$ . При нормальній температурі срібло з’єднується із сіркою ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), і тому його не рекомендують використовувати поблизу речовин, які містять сірку, наприклад, поблизу вулканізованої гуми чи ебоніту. Срібло використовується як контактний матеріал у комутаційних пристроях, у складі деяких припоїв, у виготовленні срібно-цинкових і срібно-кадмієвих акумуляторів. Сплави срібла з платиною (3,6...12,6 % Pt), паладієм (19,6...40,5 % Pd), міддю (2,7...50,5 % Cu), магнієм, нікелем, магнієм і цирконієм успішно використовуються як провідникові матеріали при виготовленні конденсаторів, гальванічне покриття надвисокочастотних пристроїв, а також як струмопровідні плівки.

**Платина Pt** – блискучий тугоплавкий ( $T_{\text{плавл}}=1770^{\circ}\text{C}$ ), дуже щільний ( $d=21,45$  г/см<sup>3</sup>), пластичний і хімічно дуже стійкий метал, має питомий опір  $\rho=0,098$  мкОм·м. Платина повільно розчиняється лише в “царській горілиці”. Платина через високу вартість використовується рідко – при виготовленні високотемпературних термопар у парі з платино-родієм, а також при створенні сплавів з паладієм, сріблом, золотом, іридієм, родієм, рутенієм, міддю, нікелем з подальшим їх використанням як контактних матеріалів та припоїв.

**Паладій Pd** – сріблясто-білий метал з питомим опором  $\rho=0,108$  мкОм·м, плавиться при  $1550^{\circ}\text{C}$ , при кімнатній температурі реагує з хлором і бромом. На повітрі при нагріванні до  $600\text{...}700^{\circ}\text{C}$  паладій окислюється.

В одному об'ємі паладію може розчинитися 900 об'ємів водню, який потім виділяється при 350...500°C. Паладій в 4–5 разів дешевше платини, близький за властивостями до платини, і тому в деяких випадках замінює її.

### **3.6 Неметалеві провідникові матеріали та вироби**

Серед неметалевих провідникових матеріалів найбільше значення мають електротехнічні вугільні матеріали. Вони мають досить високу електро- і теплопровідність, дуже низький коефіцієнт тертя, високу хімічну стійкість і нагрівостійкість. Як первинну сировину для отримання таких матеріалів використовують *графіт*, *сажу* і *антрацит*.

*Природний графіт* – м'яка кристалічна речовина темно-сірого кольору, має шарувату будову. Окремі шари графіту віддалені один від одного і легко відшаровуються, що важливо для роботи ковзних контактів. Цю властивість використовують у сухих мастилах.

*Сажа* – вугільний порошок високого ступеня дисперсності з домішками смолистих речовин. Графітова структура сажі не цілком сформована. Сажу отримують при неповному згорянні різних органічних речовин.

*Антрацит* – викопне вугілля блискучого чорного кольору, має найбільш високу ступінь зміни структури серед інших видів кам'яного вугілля.

З вугільних матеріалів виготовляють електроди для електродугових печей та електролітичних ванн, електричні щітки для електричних машин та автотрансформаторів, вугільні порошки для мікрофонів і резисторів.

#### **3.6.1 Вугільні електроди**

Вугільні електроди виробляють з роздрібненої вугільної маси разом зі сполучною речовиною. З цієї маси виготовляють заготовки шляхом її продавлення через мундштук або пресування в прес-формах. Як сполучну речовину використовують кам'яновугільну смолу (побічний продукт коксування кам'яного вугілля), а також інколи рідке скло.

Вугільні заготовки проходять процес випалу при температурі близько 800°C і потім, у разі потреби в покращенні виробів, процес графітування при температурі 2200...2500°C. Графітування дозволяє суттєво зменшити питомий опір вугільних електродів – з  $\rho=50$  до 15 мкОм·м, знизити твердість та підвищити допустиму густину електричного струму в них з  $J_{\text{дон}}=1,5$  до  $J_{\text{дон}}=2,0$  А/мм<sup>2</sup> [5]. Для вугільних електродів, що працюють при високих температурах, процес графітування проводять при ще більш високій температурі – при 3000°C.

### **3.6.2 Електричні щітки**

Електричні щітки призначені для забезпечення ковзного електричного контакту між рухомою частиною електричної машини (колектором) і нерухомою частиною з урахуванням того, що між щіткою і колектором можуть виникати іскри і навіть електричні дуги внаслідок комутаційних процесів. Звідси – особливі вимоги до електричних щіток з урахуванням питомого опору  $\rho$ , допустимої густини струму  $J_{\text{дон}}$ , допустимої лінійної швидкості ковзання  $v_{\text{дон}}$ , коефіцієнта тертя, перехідного опору контактів та інших особливостей. З врахуванням цих вимог виробляють різноманітні електричні щітки, які розрізняються складом компонентів, технологічним процесом виготовлення та своїми електромеханічними характеристиками [5]:

- вугільно-графітні ( $\rho=18...60$  мкОм·м,  $J_{\text{дон}}=6...8$  А/мм<sup>2</sup>,  $v_{\text{дон}}=10...15$  м/с);
- графітні ( $\rho=10...46$  мкОм·м,  $J_{\text{дон}}=7...11$  А/мм<sup>2</sup>,  $v_{\text{дон}}=12...25$  м/с);
- електрографітовані ( $\rho=10...45$  мкОм·м,  $J_{\text{дон}}=9...11$  А/мм<sup>2</sup>,  $v_{\text{дон}}=25...45$  м/с);
- мідно-графітні ( $\rho=0,05...1,2$  мкОм·м,  $J_{\text{дон}}=12...20$  А/мм<sup>2</sup>,  $v_{\text{дон}}=12...25$  м/с).

### **3.6.3 Вугільні порошки для мікрофонів і резисторів**

Вугільні порошки виготовляють частіше з антрациту (менше з графіту) шляхом їх дроблення в порошок. Питомий опір порошку залежить від крупності зерен, щільності їх засипки, тиску та режиму термообробки. Він може змінюватись у дуже широкому діапазоні

( $\rho=0,01\dots400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Дрібнозернисті порошки отримують після просіювання крізь сито з 52 отворами, а крупнозернисті – з 45 отворами на кожному  $\text{см}^2$  поверхні сита. У процесі випалу порошку при температурі  $600\dots800^\circ\text{C}$  його питомий електричний опір збільшується. Порошки не повинні злежуватися та зліплюватися під впливом підвищеної вологи.

Вугільні резистори мають переваги перед провідниковими – менші розміри, високу верхню межу номінального опору, незначну залежність опору від напруги, температури і вологи. Як первинний матеріал для виготовлення вугільних резисторів використовують сажу, піролітичний вуглець і боровуглецеві плівки [5].

### 3.7 Напівпровідники

Напівпровідникові матеріали за питомим опором ( $\rho = 10^{-6}\dots10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) займають проміжну позицію між провідниками ( $\rho = 10^{-8}\dots10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) і діелектриками ( $\rho = 10^7\dots10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Їх питомий опір  $\rho$  може суттєво зменшитись під впливом домішок та різноманітних енергетичних факторів – температури, світла, електричного поля, магнітного поля, іонізуючого випромінювання, механічної сили.

Напівпровідники мають повністю заповнену валентну зону, яка відділена від зони провідності неширокою забороненою енергетичною зоною  $\Delta W$  (у напівпровідниках  $\Delta W < 3 \text{ eV}$ ). В домішкових напівпровідниках ця зона суттєво звужується (до  $\Delta W = 0,05 \text{ eV}$ ) завдяки спеціально підібраним донорним чи акцепторним домішкам, які легко іонізуються, віддаючи електрони в зону провідності або забираючи їх з валентної зони. Тому при посиленні впливу енергетичних факторів підвищується ймовірність збудження електронів і перехід їх в зону провідності.

Таким чином, напівпровідники за своїми властивостями наближаються до провідників, у більшості випадків вони використовуються для виготовлення керуючих напівпровідникових елементів. До напівпровідників належать деякі прості хімічні елементи та величезна кількість сплавів та хімічних сполук.

### **3.7.1 Фізичні процеси, що спостерігаються в напівпровідниках, та їх застосування**

Робота більшості напівпровідникових приладів основана на домішковій електропровідності. Для цього напівпровідникові матеріали легують заздалегідь визначеним і точно дозованим хімічним елементом (домішкою). Перед легуванням напівпровідник ретельно очищають від випадкових та шкідливих домішок за допомогою спеціальних технологій. Залежно від концентрації та виду домішок напівпровідники поділяють на: а) власні (без домішок); б) *n*-типу (донори, атоми яких віддають електрони в зону провідності при енергії теплових флуктуацій більше енергії активації електронів донора  $\Delta W_d$ ); в) *p*-типу (акцептори, атоми яких забирають електрони із зони провідності при енергії теплових флуктуацій більше енергії активації “дірок” акцептора  $\Delta W_a$ ); г) компенсовані (концентрація донорів урівноважує концентрацію акцепторів, внаслідок чого напівпровідник поводить себе як власний). При дуже високій концентрації домішок напівпровідник стає виродженим і поводить себе як метал.

Головною перевагою напівпровідникових приладів є їх керованість або суттєва залежність з боку теплової енергії (терморезистори), світла (фоторезистори), механічної сили (тензорезистори), електричної напруги (варистори). Особливий інтерес викликають унікальні властивості так званих *p-n* переходів (контакти напівпровідників *n*-типу і *p*-типу). Здатність *p-n* – переходів пропускати електричний струм лише в одному напрямку широко використовується при виготовленні діодів, транзисторів, тиристорів та надзвичайно різноманітних інтегральних мікросхем та мікрочіпів.

#### ***Електропровідність власних напівпровідників***

Власні напівпровідники не містять легуючої домішки. До них відносяться дуже чисті прості напівпровідники (їх всього дев’ять – кремній Si, германій Ge, селен Se тощо), а також багато напівпровідникових хімічних сполук (арсенід галію GaAs, антимонід індію InSb, арсенід індію InAs тощо). У власних напівпровідниках електропровідність забезпечується переходом електронів з валентної зони в зону провідності, якщо енергія їх теплових флуктуацій перевищить ширину забороненої

енергетичної зони  $\Delta W$ . З відходом електрона в зону провідності валентна зона стає не повністю заповненою. На колишньому місці виникає дефіцит електрона – залишається так звана дірка, яку вважають позитивно зарядженою частинкою. Таким чином, у кристалі напівпровідника утворюється пара вільних носіїв заряду (електрон в зоні провідності і дірка у валентній зоні), які створюють власну електропровідність напівпровідників – електронно-діркову провідність [6].

За відсутності зовнішнього електричного поля електрон і дірка здійснюють теплові хаотичні рухи в межах кристала. За наявності ж зовнішнього електричного поля буде відбуватися направлений рух електрона проти електричного поля і дірки в напрямку електричного поля, тобто виникне електричний струм. При цьому дірка як позитивна частинка твердого напівпровідника переміщуватись фізично не може. Насправді переміщується захоплений діркою електрон сусіднього атома, який створює дірку на колишньому своєму місці та ілюзію переміщення дірки. Слід зазначити, що вільні електрони мають більшу рухливість, ніж дірки. Тому при однаковій концентрації вільних електронів і дірок власна електропровідність напівпровідників має переважно електронний тип.

### ***Електропровідність напівпровідників n-типу***

Легування власних напівпровідників донорами дозволяє отримати напівпровідники n-типу. Для напівпровідників четвертої групи періодичної таблиці, наприклад, для кремнію донорами можуть бути домішки елементів п'ятої групи таблиці (фосфор, арсен, сурма). Ці атоми мають на валентній оболонці на один електрон більше, ніж атоми напівпровідника, тобто “зайвий” електрон. При енергії теплових флуктуацій атомів більше енергії активації електронів донора  $\Delta W_0$  “зайві” електрони зі значною ймовірністю переходять у зону провідності, і тому можуть брати участь в електричному струмі за наявності зовнішнього електричного поля. У напівпровідниках n-типу, електрони вважаються основними носіями заряду, а електропровідність – електронною. Кількість електронів у зоні провідності залежить від концентрації донорів, енергії донорських рівнів, ширини забороненої енергетичної зони напівпровідника, температури. Легування донорами

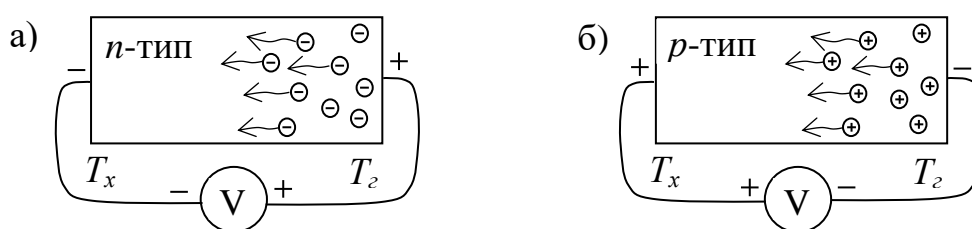
проводиться до рівня  $10^{13} \dots 10^{19}$  атомів на  $\text{см}^3$ . При занадто високій концентрації донорів напівпровідник може виродитись у провідник.

### ***Електропровідність напівпровідників $p$ -типу***

Легування власних напівпровідників акцепторами дозволяє отримати напівпровідники  $p$ -типу. Для напівпровідників четвертої групи періодичної таблиці, наприклад, для кремнію акцепторами можуть бути домішки елементів третьої групи таблиці (бор, алюміній, індій). Якщо кремній легувати 3-валентним індієм, то для утворення зв'язків з кремнієм у атома індію не вистачає одного електрона. В результаті у валентній зоні утворюється дефіцит електронів, який прийнято називати діркою. При енергії теплових флуктуацій атомів більше енергії активації дірок акцептора  $\Delta W_a$  “зайві” дірки зі значною ймовірністю переходять у зону провідності, і тому можуть брати участь в електричному струмі за наявності зовнішнього електричного поля. У напівпровідниках  $p$ -типу дірки вважаються основними носіями заряду, а електропровідність – дірковою.

### ***Визначення типу електропровідності напівпровідників***

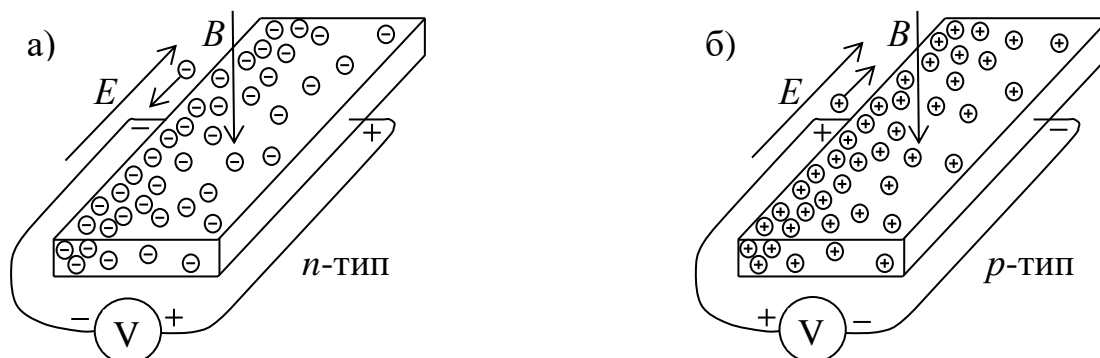
Існування “зайвих” електронів і електропровідність напівпровідника  $n$ -типу можна підтвердити дуже простим експериментом – нагріти один з кінців напівпровідника і визначити полярність електричних потенціалів гарячого і холодного його кінців. Під впливом тепла “зайві” електрони почнуть у більшій кількості переходити в зону провідності і далі переміщуватися до холодного кінця, де їх у вільному стані набагато менше. В результаті такого переміщення холодний кінець напівпровідника  $n$ -типу з температурою  $T_x$  заряджатиметься негативно, а гарячий його кінець з температурою  $T_2$  – позитивно (рис. 3.11, а).



**Рисунок 3.11 – Картина визначення електропровідності напівпровідника  $n$ -типу (а) і  $p$ -типу (б) шляхом нагрівання одного з його кінців та схема виміру різниці потенціалів**

Аналогічно можна підтвердити існування “зайвих” дірок і електропровідність напівпровідника  $p$ -типу. Під впливом тепла “зайві” дірки почнуть у більшій кількості переходити в зону провідності і далі мігрувати до холодного кінця, де їх у вільному стані набагато менше (рис. 3.11, б). У результаті цього холодний кінець напівпровідника  $p$ -типу заряджатиметься позитивно, а гарячий його кінець – негативно.

Тип електропровідності напівпровідників можна також визначити на основі ефекту Холла. Для цього пластинку напівпровідника необхідно помістити в зовнішнє поперечне магнітне поле (першу пару його граней розмістити перпендикулярно вектору магнітної індукції  $B$ ), прикласти різницю електричних потенціалів між другою парою його граней, створюючи уздовж напівпровідника електричне поле напруженістю  $E$ , і визначити полярність електричних потенціалів на третій парі граней напівпровідника (рис.3.12).



**Рисунок 3.12 – Картина (схеми) визначення електропровідності напівпровідників  $n$ -типу (а) і  $p$ -типу (б) за допомогою ефекту Холла**

Під впливом сил електричного поля “зайві” електрони в напівпровіднику з електропровідністю  $n$ -типу будуть переміщуватися проти вектора напруженості  $E$  електричного поля і створювати таким чином електричний струм уздовж напівпровідника (рис. 3.12, а). Одночасно, що ці електрони будуть зміщуватися вліво під впливом сил Ампера чи Лоренца за правилом лівої руки при вибраних на рис. 3.12 напрямках векторів  $E$  і  $B$ . Внаслідок цього зміщення ліва грань пластинки напівпровідника  $n$ -типу буде заряджатися негативно, а права – позитивно.

Якщо в таких самих умовах буде знаходитися напівпровідник з електропровідністю  $p$ -типу, то його “зайві” дірки будуть переміщу-



ватись у напрямку вектора напруженості  $E$  електричного поля (рис. 3.12, б). Одночасно з цим ці позитивні за полярністю дірки будуть зміщуватися вліво за тими ж законами і правилами. Внаслідок цього зміщення ліва грань пластинки напівпровідника  $p$ -типу буде заряджатися навпаки позитивно, а права – негативно.

Ефект Холла цікавий не тільки для визначення типу електропровідності напівпровідника, але і як основа створення напівпровідникових приладів для вимірювання напруженості магнітного поля або перемноження двох аналогових величин при вимірюванні електричної потужності.

**Вплив температури на електропровідність** домішкових напівпровідників пов'язаний з енергією теплових флуктуацій атомів. Якщо ця енергія перевищує енергію активації електронів донора  $\Delta W_d$  (для напівпровідників  $n$ -типу) або енергію активації дірок акцептора  $\Delta W_a$  (для напівпровідників  $p$ -типу), то вірогідність переходу носіїв заряду в зону провідності, а значить і електропровідність, сильно зростає у міру збільшення температури. Ця особливість використовується в терморезисторах – в напівпровідникових резисторах, які значно змінюють свій електричний опір при зміні температури. До основних характеристик терморезисторів можна віднести номінальний опір  $R$  і його температурна залежність  $R=f(T)$ . Якщо ця залежність має обернено пропорційний характер (якщо  $R$  зменшується при збільшенні  $T$ ), то такі терморезистори називають термісторами. Їх виготовляють зазвичай з напівпровідникової кераміки на основі оксидів титану, ванадію, хрому, марганцю, заліза, кобальту, міді або цинку. Якщо ж залежність  $R=f(T)$  має пропорційний характер (якщо  $R$  збільшується при зростанні  $T$ ), то такі терморезистори називають позисторами. Їх виготовляють зазвичай з напівпровідникової кераміки на основі титанату барію  $BaTiO_3$ . (із сегнетоелектрика) і використовують при температурі вище точки Кюрі  $T_k$ . При нагріванні такого позистора його електричний опір може збільшуватись у тисячі і навіть у десятки тисяч разів [6].

**Фотопровідність** – це здатність напівпровідників збільшувати електропровідність під впливом електромагнітного випромінювання в світловому діапазоні завдяки невеликій ширині забороненої

енергетичної зони  $\Delta W$ . Напівпровідникові прилади, яким властива фотопровідність, називаються фоторезисторами. У фотопровідності проявляється квантова природа світла. За рахунок поглинання енергії квантів світла збільшується енергія теплових флуктуацій атомів напівпровідника, а значить вірогідність до переходу більшої кількості носіїв заряду з валентної зони в зону провідності. Це призводить до збільшення електричного струму у напівпровіднику за наявності електричного поля (прикладеної електричної напруги). Різниця між електричним струмом у напівпровіднику під впливом електромагнітного випромінювання (світловий струм) і електричним струмом в темноті (темновий струм) при незмінній напрузі називається фотострумом  $i_{\phi} = \gamma_{\phi} \cdot u$ , де  $u$  – електрична напруга, яка прикладена до напівпровідника і  $\gamma_{\phi}$  – фотопровідність, яка нелінійно залежить від властивостей напівпровідника, освітленості (щільності світлового потоку) і частоти чи довжини хвиль електромагнітних коливань у світловому діапазоні (енергії світлових фотонів). Залежність  $\gamma_{\phi}$  напівпровідників від освітленості використовується для виготовлення фоторезисторів та створення різноманітних фоточутливих приладів у потрібному діапазоні електромагнітних коливань – від інфрачервоних до ультрафіолетових хвиль. Для цього широко використовують сульфід, селенід і теллурид кадмію (CdS, CdSe, CdTe), свинцю (PbS, PbSe, PbTe) і вісмуту (Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>), а також монокристали кремнію Si і германію Ge.

***Вплив електричного поля на електропровідність*** напівпровідників суттєво проявляється лише в сильних електричних поля, коли напруженість електричного поля перевищує певне критичне значення  $E_{кр}$ , яке залежить від особливостей напівпровідника, його температури та концентрації домішки, і складає близько  $10^4 \dots 10^6$  В/м. Існує чотири різновиди механізму впливу електричного поля на електропровідність напівпровідників – термоелектронна іонізація, тунельний ефект, ударна іонізація і тепловий пробій.

***Термоелектронна іонізація*** відбувається під впливом сильного електричного поля (при  $E > E_{кр}$ ) і відносно низьких температурах. Електричне поле збільшує кінетичну енергію носіїв зарядів під час їх

теплових рухів, що полегшує термічну активацію (термоелектронну іонізацію), знижує енергію активації  $\Delta W$ , яка необхідна для теплового перекидання носіїв заряду з домішкових рівнів (із зони валентності) в зону провідності, і таким чином призводить до збільшення питомої електропровідності  $\gamma$  напівпровідника. У слабких електричних полях (при  $E < E_{кр}$ ) питома електропровідність  $\gamma$  від напруженості електричного поля  $E$  практично не залежить.

**Тунельний ефект** (електростатична іонізація) настає при значно більшій напруженості електричного поля (при  $E > 10^7$  В/м) майже незалежно від температури, і дещо нагадує холодну емісію електронів з металів. При напруженості  $E \approx E_{кр}$  відбувається процес поступового надходження носіїв заряду з валентної і домішкової зон у зону провідності. Цей процес називають тунельним “просоченням”. При збільшенні напруженості електричного поля (при  $E > 10^7$  В/м) і зменшенні ширини, забороненою енергетичною зоною,  $\Delta W$  ймовірність тунельного просочення носіїв заряду різко посилюється, а значить різко зростає густина тунельного струму.

**Ударна іонізація** – процес лавиноподібного збільшення концентрації вільних носіїв заряду при напруженості електричного поля  $E = 10^7 \dots 10^8$  В/м, який дещо нагадує електричний пробій газоподібного діелектрика. При такій великій напруженості електричного поля вільні електрони на довжині  $\lambda$  їх вільного пробігу встигають настільки “розігрітись” (прискоритись), що здатні при зіткненні з атомами домішки чи напівпровідника закинути зв’язані з ними електрони в зону провідності. При  $E > E_{проб}$  відбувається електричний пробій. На відміну від електричного пробію твердих діелектриків електричний пробій напівпровідника не призводить до його електричного руйнування і є нормальним режимом роботи деяких напівпровідникових приладів, наприклад, стабілітронів.

**Тепловий пробій** напівпровідника настає тоді, коли порушена рівновага між процесом виділення теплової енергії в напівпровіднику і процесом її передачі в оточуюче середовище. Тепловий пробій призводить до руйнування напівпровідника, тобто є незворотнім процесом.

### **3.7.2 Технології створення напівпровідникових матеріалів**

При виготовленні напівпровідників висуваються надто високі вимоги щодо їх чистоти. Якість очищення має бути такою, щоб електропровідність очищеного напівпровідника була не більшою, ніж його власна електропровідність. Наприклад, вміст випадкових домішок не повинен перевищувати  $10^{-11}$  % в кремнію Si,  $5 \cdot 10^{-90}$  % в германію Ge,  $8 \cdot 10^{-30}$  % в селені Se. Особливо чисті монокристалічні злитки отримують за приблизно такою схемою [6]: а) виготовлення технічно чистого простого напівпровідника; б) попереднє очищення напівпровідника; в) приготування полікристалічних злитків; г) глибоке очищення полікристалічних злитків методами зонної плавки або вирощування кристалів. В процесі отримання монокристалічного злитка напівпровідник легують, якщо це передбачено технологією створення.

*Прості напівпровідники* при  $20^\circ\text{C}$  мають заборонені енергетичні зони шириною  $\Delta W = 0,36 \dots 2,5$  еВ. До простих напівпровідників відносяться дев'ять хімічних елементів [5]: бор В ( $3\text{CЗ} - 1,1$  еВ), кремній Si ( $\Delta W = 1,12$  еВ), германій Ge ( $\Delta W = 0,72$  еВ), фосфор Р ( $\Delta W = 1,5$  еВ), арсен As ( $\Delta W = 1,2$  еВ), сірка S ( $\Delta W = 2,5$  еВ), селен Se ( $\Delta W = 1,7$  еВ), теллур Те ( $\Delta W = 0,36$  еВ) і йод J ( $\Delta W = 1,25$  еВ). Найбільш розповсюдженими серед простих напівпровідників є *кремній, германій та селен*.

*Кремній* є другим за поширеністю хімічним елементом у природі після кисню, у вільному вигляді в природі не зустрічається – в основному у вигляді двоокису кремнію  $\text{SiO}_2$ . Кремній кристалізується з утворенням кубічних просторових решіток типу алмазу зі сторонами розміром  $0,357$  нм. Кожен атом кремнію в цих решітках знаходиться на однаковій відстані від чотирьох сусідніх атомів. Кремній плавиться при температурі  $1417^\circ\text{C}$ , інтенсивно окислюється при температурі вище  $900^\circ\text{C}$ . При температурі нижче  $6,7$  К і тиску вище  $12$  ГПа кремній переходить в надпровідний стан. Відносно широка заборонена енергетична зона кремнію ( $\Delta W = 1,12$  еВ) дозволяє виготовляти з нього напівпровідникові прилади з високою робочою температурою (до  $120 \dots 200^\circ\text{C}$ ). Ступінь очищення кремнію визначають шляхом вимірювання його питомого електричного опору – чим більше питомий електричний опір,

тим чистіше кремній. Питомий опір особливо чистого кремнію при власній його електропровідності  $\rho = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

**Германій** є одним з перших напівпровідникових матеріалів, найбільш задіяних у виготовленні напівпровідникових приладів. Його вміст у земній корі дуже невеликий і не має значних скупчень. Германій кристалізується з утворенням кубічних просторових решіток типу алмазу зі сторонами розміром 0,3566 нм. Атоми германію утримуються у вузлах решіток за рахунок рівноцінних ковалентних зв'язків так само, як і у кремнію. Германій плавиться при температурі 936 °С. При температурі нижче 5,4 К і тиску вище 11 ГПа германій переходить в надпровідний стан. Відносно вузька заборонена енергетична зона германію ( $\Delta W = 0,72 \text{ eV}$ ) дозволяє виготовляти з нього напівпровідникові прилади зі значно нижчою робочою температурою порівняно з кремнієм (до 70 °С). Ступінь очищення германію визначають, як і у кремнію, орієнтуючись на питомий електричний опір  $\rho = 0,68 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  особливо чистого германію при власній його електропровідності. Германій практично не взаємодіє з кремнієм при нагріванні до 1500 °С, що дозволяє широко використовувати кварцові тиглі для отримання особливо чистих полікристалічних злитків германію.

**Селен** – використовується для виготовлення діодів та фотоелементів. Температурний інтервал роботи селенових випрямлячів від -60 до +75 °С. За своїми властивостями селенові випрямлячі значно поступаються перед германієвими і, тим більше, перед кремнієвими.

**Напівпровідникові хімічні сполуки** мають різні властивості, які в багатьох випадках кращі за прості напівпровідники. Деякі з них мають доволі значну заборонену енергетичну зону, що дозволяє підвищити робочу температуру до +300 °С (арсенід галію GaAs), до +400 °С (фосфід галію GaP) і навіть до +600 °С (карбід кремнію SiC). З хімічних сполук найбільше використовують бінарні типу  $A^{IV}B^{IV}$ ,  $A^{III}B^{V}$ ,  $A^{II}B^{VI}$ . Ці сполуки мають кристалічну структуру, яка подібна решіткам алмазу і відрізняються лише природою і розмірами складових частинок. Крім того, як напівпровідникові хімічні сполуки використовуються також оксидні напівпровідники.

Єдиною напівпровідниковою бінарною *хімічною сполукою типу  $A^{IV}B^{IV}$*  є *карбід кремнію SiC*.

*Карбід кремнію* має високу твердість (майже не поступається алмазу), дуже високу робочу температуру (+600 °C). Для утворення монокристалів карбиду кремнію застосовують метод сублімації – вирощення кристалів з газової фази в графітних тиглях в атмосфері інертного газу при температурі 2500...2600 °C. Монокристалічний карбід кремнію використовують при виготовленні світлодіодів, високотемпературних силових напівпровідникових приладів, польових транзисторів, тунельних діодів, терморезисторів, фоторезисторів, варисторів і сонячних елементів.

Для утворення напівпровідникових *хімічних сполук типу  $A^{III}B^V$*  як елемент  $A^{III}$  III групи періодичної таблиці Менделєєва використовують бор B, алюміній Al, галій Ga, індій In. Як елемент  $B^V$  V групи періодичної таблиці Менделєєва використовують фосфор P, арсеній As, сурму Sb, азот N. Ці сполуки мають кубічну кристалічну структуру. Найбільш задіяними і вивченими сполуками типу  $A^{III}B^V$  є фосфіди (фосфід галію GaP), арсеніди (арсенід галію GaAs, арсенід індію InAs), антимоніди (антимонід індію InSb, антимонід галію GaSb), нітриди (нітрид алюмінію AlN, нітрид галію GaN, нітрид індію InN). Сполуки типу  $A^{III}B^V$  хімічно стійкі і мають високу рухливість електронів. Найважливіші характеристики сполук типу  $A^{III}B^V$  визначаються в основному властивостями і концентрацією домішок. Легування цими домішками здійснюють зазвичай одночасно з вирощуванням монокристалів.

До *хімічних сполук типу  $A^{II}B^{VI}$*  належать так звані халькогеніди – бінарні хімічні сполуки металів II групи періодичної таблиці Менделєєва з халькогенами (сіркою S, селеном Se і телуrom Te). Надлишок металу  $A^{II}$  в цих сполуках обумовлює електронну провідність, а надлишок халькогенів  $B^{VI}$  – діркову провідність. Халькогеніди характеризуються підвищеною чутливістю до електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот – від інфрачервоного до рентгенівського випромінювання. Тому вони широко використовуються при виготовленні фоторезисторів і люмінофорів. Серед халькогенідів найбільшого поширення набули сульфіди, селенід і телуриди цинку (ZnS, ZnSe, ZnTe), кадмію (CdS, CdSe, CdTe) і ртуті (HgS, HgSe, HgTe).

**Оксидними напівпровідниками** називають бінарні хімічні сполуки з киснем металів перехідної групи періодичної таблиці Менделєєва. До цих сполук належать оксиди титану Ti, ванадію V, хрому Cr, марганцю Mn, заліза Fe, кобальту Co, нікелю Ni, міді Cu, цинку Zn ( $MnO$ ,  $Mn_3O_4$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ ,  $ZnFeO_4$ ,  $MnCr_2O_4$ ). В оксидних напівпровідниках основним видом електропровідності є електронна провідність. З цих матеріалів виготовляють терморезистори, виристори та інші прилади за методами керамічних технологій.

### **3.7.3 Основні властивості $p-n$ – переходів**

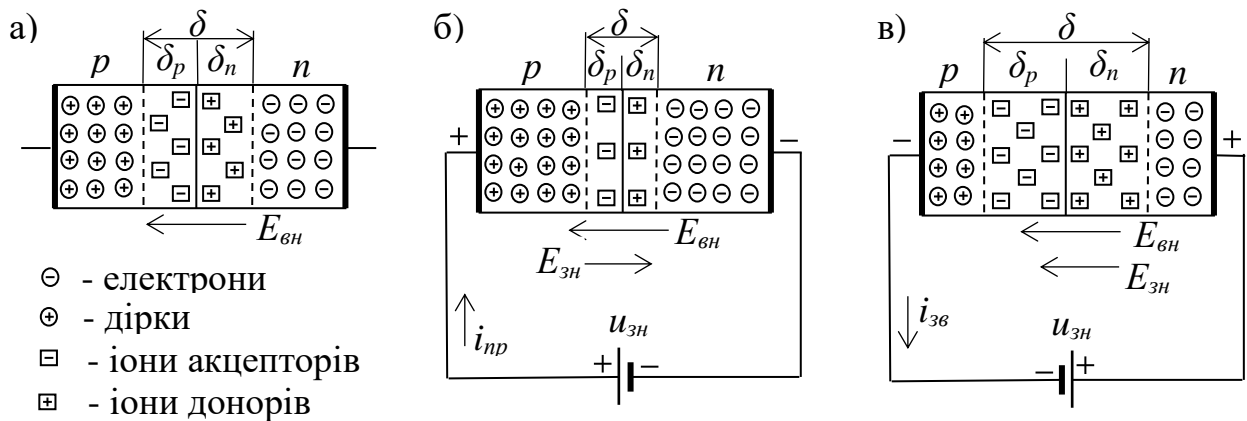
Властивості  $p-n$  – переходів, які виникають при контактах напівпровідників  $n$ -типу і  $p$ -типу, обумовлені унікальними особливостями перехідного контакту між напівпровідником  $n$ -типу, в якому завдяки донорній домішці електрони є основними носіями заряду, і напівпровідником  $p$ -типу, в якому завдяки акцепторній домішці дірки є основними носіями заряду. Простим дотиком пластин цих двох напівпровідників такий перехідний контакт утворити неможливо через забруднення їх поверхні (навіть при ідеальній технології очищення), а також через порушення кристалічної структури. Тому перехідний контакт отримують методом дифузії або шляхом вплавлення відповідних домішок у пластину монокристала напівпровідника.

Розглянемо явища, які виникають при електричному контакті між напівпровідниковими пластинами  $p$ -типу та  $n$ -типу для трьох варіантів прикладення напруги  $U_z$  від зовнішнього джерела електричного живлення до єдиного кристалу напівпровідників двох типів з  $p-n$  – переходом.

За **варіантом “а”** напруга зовнішнього джерела відсутня ( $u_{zn}=0$ ). Електрони в  $n$ -області і дірки в  $p$ -області є основними носіями зарядів, які виникають внаслідок іонізації атомів донорної і акцепторної домішок. При не дуже низькій температурі практично всі атоми цих домішок іонізовані. Тому концентрація електронів у  $n$ -області практично дорівнює концентрації донорних атомів, а концентрація дірок у  $p$ -області – концентрації акцепторних атомів [6]. На межі цих областей виникає градієнт концентрації носіїв заряду і взаємна теплова дифузія. Частина електронів з  $n$ -області переходить в  $p$ -область і рекомбінує з

дірками  $p$ - області в примежовій зоні. Внаслідок цього в межовій зоні  $n$ -області шириною  $\delta_n$  практично не залишається вільних електронів. Тому в зоні  $\delta_n$  формується нерухомий об'ємний позитивний заряд іонізованих донорських атомів (рис. 3.13, а).

Аналогічним чином частина дірок з  $p$ -області переході в  $n$ -область, які рекомбінують з електронами  $n$ -області в примежовій зоні. Внаслідок цього в межовій зоні  $p$ - області шириною  $\delta_p$  практично не залишається вільних дірок. Тому в зоні  $\delta_p$  формується нерухомий об'ємний негативний заряд іонізованих акцепторних атомів. Між цими об'ємними зарядами виникає внутрішнє електричне поле напруженістю  $E_{вн}$ . Це поле є гальмівним для основних носіїв заряду і прискорюваним для неосновних носіїв заряду.



**Рисунок 3.13 – Картина основних властивостей  $p$ - $n$  – переходу при:  $u_{zn}=0$  (а), при  $u_{zn} > \phi_k$ , коли  $p$ - $n$  – перехід відкритий (б) і при  $u_{zn} < \phi_k$ , коли  $p$ - $n$  – перехід закритий (в)**

При певному значенні  $E_{вн} > \phi_k$ , де  $\phi_k$  – потенціальний бар'єр, внутрішнє електричне поле перешкоджає подальшій дифузії основних носіїв заряду і спричиняє зворотний дрейфовий струм. Коли дифузійний і дрейфовий струми вирівнюються настає термодинамічна рівновага при незмінній температурі і відсутності зовнішнього електричного поля. Утворюється подвійний запірний шар товщиною  $\delta = \delta_n + \delta_p \approx 1$  мкм ( $p$ - $n$  – перехід) з високим опором через дуже малу концентрацію в цьому шарі вільних електронів і дірок. Для германію потенціальний бар'єр  $\phi_k = 0,2 \dots 0,4$  В, а для кремнію  $\phi_k = 0,5 \dots 0,75$  В.



За **варіантом “б”** зовнішнє джерело електричного живлення своїм електричним полем напруженістю  $E_{zn}$  діє назустріч внутрішньому електричному полю  $E_{вн}$  (рис. 3.13, б). Тому результуюча напруженість поля в  $p-n$  – переході  $E_{рез} = E_{вн} - E_{zn}$  зменшується, що призведе до зниження його потенціального бар’єра ( $\varphi_{рез} = \varphi_k - u_{zn}$ ) і зменшення відстані  $\delta$ . Такий варіант прийнято називати прямим вмиканням  $p-n$  – переходу. В цьому варіанті запірний шар  $\delta$  заповнюється носіями заряду та звужується, і при певному значенні напруги  $u_{zn}$  зовнішнього джерела  $p-n$  – перехід стає відкритим для так званого прямого електричного струму  $i_{пр}$ . Цей струм обумовлений рухом основних носіїв заряду з відносно великою енергією, достатньою для подолання потенціального бар’єра  $\varphi_{рез}$  запірного шару і проникнення в сусідні області. При цьому електрони проникають з  $n$ -області в  $p$ -область, а дірки з  $p$ -області в  $n$ -область, де вони рекомбінують. Падіння напруги на  $p-n$  – переході в такому випадку називають прямим падінням напруги  $U_{пр}$  і вважають позитивним.

За **варіантом “в”** зовнішнє джерело електричного живлення своїм електричним полем напруженістю  $E_{zn}$  співпадає за своїм напрямком дії з внутрішнім електричним полем  $E_{вн}$  (рис. 3.13, в). Тому результуюча напруженість поля в  $p-n$  – переході ( $E_{рез} = E_{вн} + E_{zn}$ ) збільшується, що призведе до зростання його потенціального бар’єра  $\varphi_{рез} = \varphi_k + u_{zn}$  і збільшення  $\delta$ . Такий варіант прийнято називати зворотним вмиканням  $p-n$  – переходу. В цьому варіанті під дією зовнішньої напруги  $u_{zn}$  електрони і дірки як основні носії заряду зміщуються в різні боки від  $p-n$  – переходу, запірний шар  $\delta$  розширюється, і  $p-n$  – перехід стає закритим для електричного струму. Основні носії заряду не в змозі подолати потенційний бар’єр  $\varphi_{рез}$   $p-n$  – переходу і перейти в сусідні області. Падіння напруги на  $p-n$  переході в такому випадку називають зворотною напругою  $u_{зв}$  і вважають негативною. При  $u_{зв} > |u_{проб}|$  відбувається пробій  $p-n$  – переходу внаслідок лавиноподібного збільшення концентрації вільних носіїв заряду, де  $u_{проб}$  – напруга електричного пробую.

Реальні напівпровідники, окрім основних носіїв заряду (електрони в  $n$ -області і дірки в  $p$ - області), містять дуже невелику кількість неосновних носіїв заряду (електрони в  $p$ -області і дірки в  $n$ -області),

для яких потенціальний бар'єр  $p-n$  – переходу взагалі відсутній. Тому виникає дуже малий зворотний струм  $i_{зв}$  при зворотному вмиканні  $p-n$  – переходу напівпровідників.

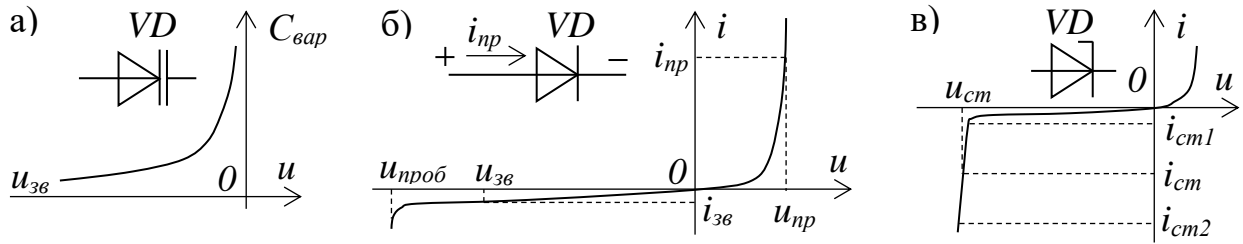
#### **3.7.4 Використання властивостей $p-n$ – переходів**

Властивості  $p-n$  – переходів, які виникають при електричних контактах напівпровідників  $n$ -типу і  $p$ -типу, пов'язані з їх здатністю пропускати електричний струм лише в одному напрямку (вентильні властивості), а також керованістю цього процесу. Ці властивості покладені в основу принципу роботи великої кількості напівпровідникових приладів – діодів, транзисторів, тиристорів, стабілітронів, варикапів, інтегральних мікросхем, мікročіпів. Такі напівпровідникові прилади здатні працювати лише при помірній температурі, при якій домішкова електропровідність домінує над власною електропровідністю напівпровідника. Поява власної електропровідності при надто високій температурі призводить до порушення нормальної роботи і керованості  $p-n$  – переходу.

**Варикап** – напівпровідниковий конденсатор з електрично керованою ємністю. Його робота основана на діелектричних властивостях потенційного бар'єра  $p-n$ –переходу напівпровідників  $\varphi_{рез} = \varphi_k + u_{zn}$  і  $\delta$  при зворотному вмиканні  $p-n$ –переходу. Цей бар'єр змінюється пропорційно зворотній напрузі  $u_{зв}$  зовнішнього джерела (рис. 3.13, в). Ємність плоского варикапа  $C_{вар}$  визначається в принципі за такою самою формулою, як і ємність звичайного плоского конденсатора (1.4), але як відстань між обкладинками варикапа потрібно розглядати ширину  $\delta$  запірного шару  $p-n$  – переходу. Залежність ємності варикапа від абсолютного значення зворотної напруги  $u_{зв}$  має обернено пропорційний характер і нагадує гіперболу, враховуючи формулу (1.4), і пряму залежність ширини  $\delta$  запірного шару  $p-n$  – переходу від  $u_{зв}$ , (рис. 3.14, а).

**Діод** – напівпровідниковий прилад, в якому використовуються вентильні властивості  $p-n$  – переходу напівпровідників. Діоди зазвичай використовуються для випрямлення змінного електричного струму.

Залежність електричного струму діода  $i(u)$  від прикладеної напруги (вольт-амперна характеристика) має суттєво нелінійний характер (рис. 3.14, б). При прямому включенні діода (при  $u > 0$ ) в ньому виникає прямий електричний струм  $i_{пр}$  і пряме падіння напруги  $u_{пр}$ , яке



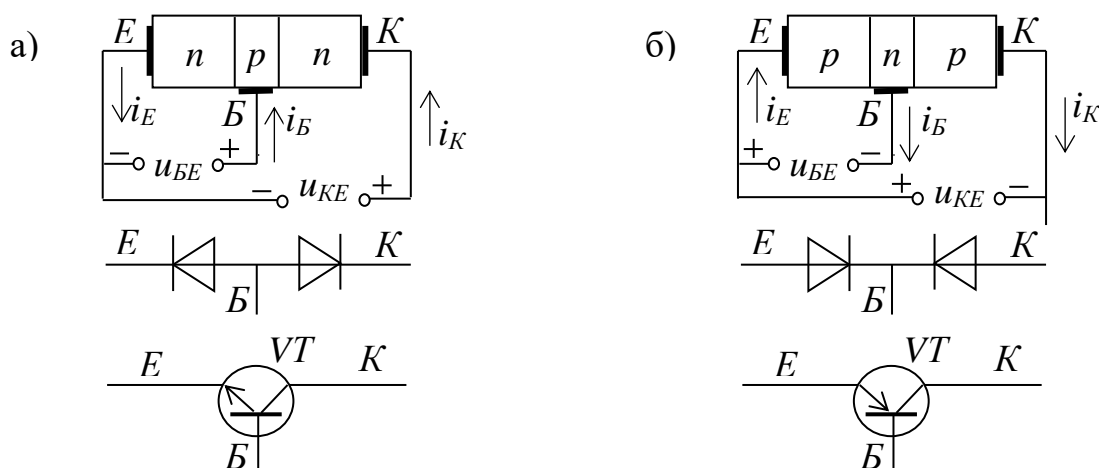
**Рисунок 3.14 – Основні характеристики варикапа (а), діода (б) і стабілітрона (в)**

може складати  $0,2 \dots 1,1$  В, і в звичайних умовах є головною причиною нагрівання діода через втрати  $\Delta P = u_{пр} \cdot i_{пр}$ . При зворотному включенні діода (при  $u < 0$ ) діод зазвичай майже не пропускає зворотний струм  $i_{зв}$ . Тому цим струмом та втратами  $\Delta P = u_{зв} \cdot i_{зв}$  часто нехтують. Але при використанні діодів у високочастотних пристроях, особливо, коли до діода прикладена змінна напруга у вигляді прямокутних імпульсів з дуже крутими фронтами, зворотним струмом і втратами від нього нехтувати не можна. В таких випадках доводиться навіть розглядати роботу діода в режимі, близькому до короткого замикання, в момент перемикання його з провідного стану в непровідний стан. При високій частоті доводиться також враховувати електричну ємність  $p-n$  – переходу, яка залежить від напруги і здатна суттєво уповільнити процес перемикання діодів. При недопустимо великому значенні зворотної напруги (при  $|u_{зв}| > |u_{проб}|$ ) відбувається пробій  $p-n$  – переходу і, відповідно, втрата напівпровідникових властивостей.

**Стабілітрон** – напівпровідниковий діод, в якому пробій  $p-n$  – переходу зворотною напругою використовується як робочий режим. Діоди використовують для стабілізації зворотної напруги на рівні  $u_{см}$  в доволі широкому діапазоні значень струму стабілізації  $i_{см} = i_{см1} \dots i_{см2}$ , який протікає через стабілітрон у зворотного напрямку (рис. 3.14, в).

**Транзистор** – триелектродний керований напівпровідниковий прилад. Серед різноманітних видів транзисторів найбільш поширені біполярні транзистори. В таких транзисторах електричний струм створюють два види носіїв заряду – електрони і дірки. Біполярний транзистор має центральну напівпровідникову область одного типу

провідності (базу  $B$ ) і дві крайні напівпровідникові області іншого типу провідності (емітер  $E$  і колектор  $K$ ). Перехідні контакти між ними (два  $p$ - $n$  – переходи) створені, як і в напівпровідникових діодах, методом дифузії або шляхом додавання відповідних домішок у пластину монокрystala напівпровідника. У біполярному транзисторі можливі два варіанти чергування напівпровідників –  $n$ - $p$ - $n$  і  $p$ - $n$ - $p$ . Кожен з цих варіантів, враховуючи вентильні властивості  $p$ - $n$  – переходів, можна розглядати як два зустрічно включених напівпровідникових діоди (рис. 3.15).



**Рисунок 3.15** – Схеми включення та керуючі властивості біполярних транзисторів  $p$ - $n$ - $p$  (а) і  $n$ - $p$ - $n$  (б) типів

Колектор  $K$  відрізняється від емітера  $E$  значно більшою площею  $p$ - $n$  – переходу і значно меншою концентрацією легуючих домішок. Крім того, для керування роботою транзистора малими струмами  $i_B$  його база  $B$  повинна мати малу товщину і середню ступінь легуваності домішками.

Якщо між базою  $B$  і емітером  $E$  створити напругу  $u_{BE}$  в прямому напрямку, то  $p$ - $n$  – перехід між базою і емітером стає відкритим для переміщення основних носіїв заряду (для прямого струму  $i_B$ ). Ці носії заряду не є основними в базі, і тому легко проникають через  $p$ - $n$  – перехід між базою  $B$  і колектором  $K$ . База виготовляється достатньо тонкою, щоб основні носії заряду емітеру не встигли рекомбінувати і створити значний струм бази. Якщо ж напруга  $u_{BE}$  між базою й емітером буде малою або буде мати протилежну полярність, то струм  $i_B$ , а значить струм  $i_K$  на ділянці колектор-емітер не виникне. Таким чином,

незначний струм бази  $\Delta i_B$  здатний значно змінити струм  $\Delta i_K$  в колі колектора за рахунок зміни електричного опору  $R_{KE}$  на ділянці колектор-емітер. Це вказує на підсилювальні та керуючі можливості транзистора, тобто  $\Delta i_K / \Delta i_B \gg 1$ .

У режимі керування аналоговими сигналами можуть з'явитися великі втрати потужності  $\Delta P = (i_K)^2 R_{KE}$  у транзисторі. Тому в сучасних електронних пристроях намагаються використовувати транзистори у включеному режимі, коли втрати потужності  $\Delta P$  незначні завдяки мінімальному значенню струму  $i_K$  в закритому стані транзистора або мінімальному значенню  $R_{KE}$  у відкритому стані транзистора.

**Тиристор** – триелектродний частково керований напівпровідниковий прилад, який структурно складається з чотирьох напівпровідникових областей різного типу провідності ( $p-n-p-n$ ) з трьома  $p-n$  – переходами. Крайню  $p$ -область, до якої підключається позитивний полюс джерела живлення  $u_{AK}$ , прийнято називати анодом  $A$ , іншу крайню  $n$ -область, до якої підключається негативний полюс – катодом  $K$ , а проміжну  $p$ -область, на яку надходять позитивні керуючі сигнали  $i_Y, u_Y$ , керуючим електродом  $YE$  (рис. 3.16, а). Інколи для зручності тиристор подають у вигляді з'єднаних між собою двох транзисторів  $p-n-p$ - і  $n-p-n$ -типів (рис. 3.16, б). Як бачимо з рисунку 3.16, перехід  $\Pi_2$  є загальним колекторним переходом двох транзисторів у схемі заміщення тиристора, а переходи  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$  – емітерними.

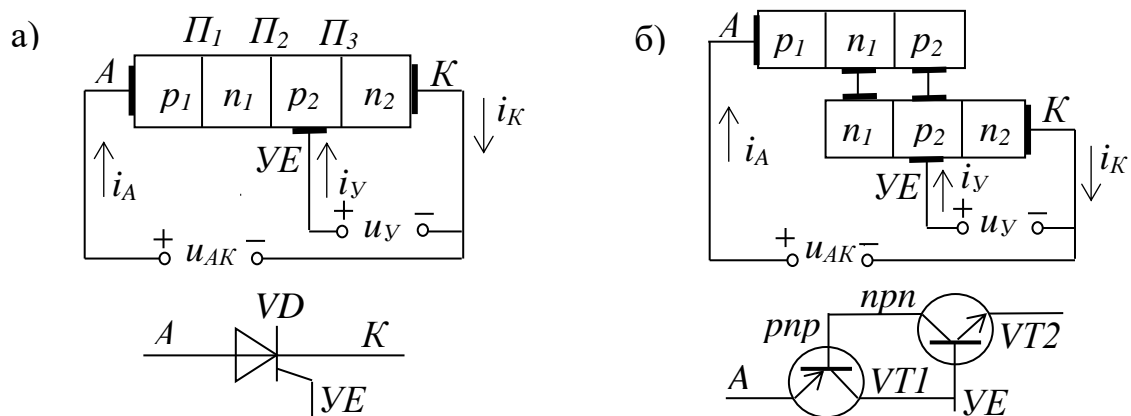


Рисунок 3.16 – Загальна схема тиристора (а) та схема заміщення його транзисторами (б)

За відсутності керуючих сигналів  $i_U$  на електроді  $UE$  тиристор практично не пропускає електричний струм у будь-яку сторону, тобто знаходиться у виключеному стані. При підвищенні прямої напруги  $u_{AK}$  джерела живлення струм  $i_A$  тиристора підвищується не суттєво, поки напруга  $u_{AK}$  не наблизиться до критичного значення – до напруги включення  $u_{вкл}$ . При  $u_{AK} > u_{вкл}$  під впливом наростаючого електричного поля в переході  $\Pi_2$  виникає різке збільшення кількості носіїв заряду внаслідок ударної іонізації при зіткненні носіїв заряду з атомами. Електрони з області  $n_2$  і дірки з області  $p_1$  спрямовуються в області  $p_2$  і  $n_1$  і насичують їх неосновними носіями заряду. Через це струм у переході  $\Pi_2$ , а значить струм  $i_A$  тиристора різко зростають до максимально можливого значення, яке визначається законом Ома і вертикальною ділянкою вольт-амперної характеристики відкритого тиристора (рис. 3.17).

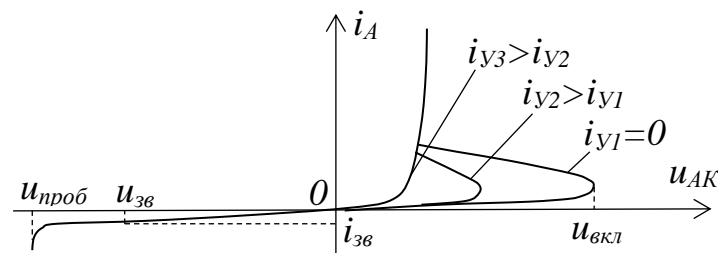


Рисунок 3.17 – Вольт-амперна характеристика тиристора

Тиристор повертається у виключений (розімкнений) стан протягом 1...100 мкс, якщо прямий струм  $i_A$  тиристора стане менше струму витримання  $i_{втр}$ . На практиці, якщо потрібно прискорити процес примусового виключення тиристора, створюють короточасні умови для зворотного струму тиристора. Тиристор, як і діод, у зворотному напрямку (при зворотній напрузі  $u_{зв}$ ) струм  $i_{зв}$  практично не пропускає. При недопустимо великому значенні зворотної напруги (при  $u_{зв} > u_{нробр}$ ) відбувається пробій тиристора і, відповідно, втрачаються його напівпровідникові властивості.

Напругу включення  $u_{вкл}$ , при якій починається лавиноподібне зростання струму  $i_A$ , може бути суттєво знижено. Для цього в область  $p_2$  (рис. 3.16, а) потрібно ввести неосновні носії заряду, що дозволить збільшити інтенсивність іонізації в  $p-n$  – переході  $\Pi_2$ . Це здійснюється шляхом подачі на керуючий електрод  $UE$  імпульсу струму керування

*i<sub>y</sub>*. При достатньо великому значенні цього струму тиристор за своєю вольт-амперною характеристикою наближається до напівпровідникового діода (рис. 3.17).

### 3.8 Приклади завдань з визначення параметрів провідникових матеріалів

#### 3.8.1 Розрахунок електропровідності провідників

**Завдання.** Визначити масу мідного проводу діаметром  $D=1$  мм, з якого виготовлена котушка електромагніту, та її індуктивність  $L$ . Котушка споживає змінний електричний струм  $I=1,7$  А, промислової частоти при напрузі  $U=220$  В і нагрівається до температури  $T=70^\circ\text{C}$  з потужністю  $P=9$  Вт.

**Розв'язок.** Масу проводу можна визначити через його довжину  $l$ , скориставшись формулами (3.1), (3.2), (3.3) та даними таблиці 3.1:

$$m = V \cdot d = S \cdot l \cdot d = 0,785 \cdot 10^{-6} \cdot 118,4 \cdot 8920 = 0,829 \text{ кг},$$

де  $V = S \cdot l$  – об'єм міді, яка витрачена на виготовлення проводу;

$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (10^{-3})^2}{4} = 0,785 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  – площа поперечного перерізу проводу;

$$l \approx R \frac{S}{\rho} = 3,1142 \frac{0,785 \cdot 10^{-6}}{0,020655 \cdot 10^{-6}} = 118,4(\text{м}) \text{ – довжина проводу (3.1);}$$

$R = \frac{P}{I^2} = \frac{9}{1,7^2} = 3,1142 \text{ Ом}$  – електричний опір котушки при температурі  $T=70^\circ\text{C}$  (3.3);

$\rho \approx \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)] = 0,017 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 0,0043 \cdot (70 - 20)] = 0,020655 \cdot 10^{-6} (\text{Ом} \cdot \text{м})$  – питомий опір міді при температурі  $T=70^\circ\text{C}$ ;

$\rho_0 = 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – питомий опір міді при температурі  $T=20^\circ\text{C}$  (табл. 3.1);

$\alpha_\rho = 0,0043 \text{ K}^{-1}$  – середній температурний коефіцієнт питомого опору в діапазоні температур  $T \dots T_0$  (табл. 3.1);

$d = 8,920 \text{ кг/м}^3$  – щільність міді (табл. 3.1).

Індуктивність котушки згідно з формулою (3.3):

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \sqrt{129,41^2 - 3,1142^2} = 0,412(\text{Гн})$$

де  $Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{1,7} = 129,41$  Ом – повний опір котушки (3.3);

$\omega = 2\pi f$  – кутова промислова частота, 1/с;

$f = 50$  Гц – промислова частота.

### **3.8.2 Розрахунок параметрів термоелектричного генератора**

**Завдання.** Визначити кількість послідовно з'єднаних електричних залізо-кобальтових контурів у складі термоелектричного генератора для отримання на його виході напругу  $U=9$  В при різниці температур спаїв  $\Delta T=80^\circ\text{C}$ , а також кількість теплової енергії, яка передається від гарячого спаю цього термогенератора до холодного щогодини (протягом  $t=3600$  с) при живленні термогенератора струмом  $I_H=1$  А.

**Розв'язок.** Кількість електричних контурів  $N$  термогенератора визначається його напругою  $U$  і різницею потенціалів  $U_{12}$  (термоелектрорушійною силою), яка характерна вибраній парі провідників (заліза і кобальту) при різниці температур спаїв  $\Delta T=80^\circ\text{C}$  (3.6):

$$N = \frac{U}{U_{12}} = \frac{U}{\psi_{12} \cdot \Delta T} = \frac{9}{36,7 \cdot 10^{-6} \cdot 80} = 3065,$$

де  $\psi_{12} = \psi_1 - \psi_2 = 16,6 \cdot 10^{-6} - (-20,1 \cdot 10^{-6}) = 36,7 \cdot 10^{-6}$  В/К – відносна питома термоелектрорушійна сила для вибраної пари провідників або коефіцієнт Зеебека (3.8);

$\psi_1 = 16,6 \cdot 10^{-6}$  В/К – абсолютна питома термоелектрорушійна сила заліза (табл. 3.1);

$\psi_2 = -20,1 \cdot 10^{-6}$  В/К – абсолютна питома термоелектрорушійна сила кобальту (табл. 3.1).

Кількість теплової енергії, яка передається від гарячого спаю термогенератора до холодного згідно з формулою (1.10)

$$W_T = I_H \cdot U \cdot t = 1 \cdot 9 \cdot 3600 = 32400 \text{ Дж} = 7739 \text{ кал.}$$



Таку саму теплову енергію передасть цей термогенератор, понижуючи температуру холодного спаю в морозильній камері, якщо спрямувати струм  $I_n=1$  А у зворотному напрямку за допомогою стороннього джерела електричної енергії. Це впливає з електротермічного ефекту Пельтьє (3.9) та зворотнього ефекту Зеєбека.

### **3.8.3 Розрахунок параметрів електронагрівального елемента**

**Завдання.** Визначити потужність електронагрівального елемента, який виготовлений з хромального проводу довжиною  $l=3$  м і діаметром  $D=0,5$  мм. Цей елемент підключений до електричного джерела з напругою  $U=220$  В і в стабільному тепловому режимі має температуру  $T=300^\circ\text{C}$ .

**Розв'язок.** Теплова потужність електронагрівального елемента  $P$  залежить від його електричного струму  $I$  (або напруги  $U$ ) і опору  $R$  (1.10), геометричних параметрів проводу (3.1), питомого опору хромалю і його температури  $T$  (3.2):

$$P = \frac{W_T}{t} = I^2 R = \frac{U^2}{R} = \frac{220^2}{21} = 2305 \text{ Вт},$$

де  $R = \rho \frac{l}{S} = 1,37 \cdot 10^{-6} \frac{3}{0,196 \cdot 10^{-6}} = 21$  Ом – електричний опір хромального проводу при робочій температурі  $T=300^\circ\text{C}$  (3.1);

$\rho \approx \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)] = 1,33 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 10^{-4} \cdot (300 - 20)] = 1,37 \cdot 10^{-6}$  (Ом · м) – питомий опір хромалю при робочій температурі  $T=300^\circ\text{C}$  (3.2);

$\rho_0 \approx 1,33 \cdot 10^{-6}$  Ом · м – питомий опір хромалю при температурі  $T_0=20^\circ\text{C}$ ;

$\alpha_\rho \approx 10^{-4}$  К<sup>-1</sup> – середній температурний коефіцієнт питомого опору хромалю в діапазоні температур  $T_0 \dots T$ ;

$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,196 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> – площа поперечного перерізу хромального проводу.

### **3.8.4 Розрахунок параметрів можливостей надпровідника**

**Завдання.** Визначити максимально можливе значення постійного електричного струму  $I_{max}$  в надпровіднику із станіду ніобію  $Nb_3Sn$  за відсутності зовнішнього магнітного поля при робочій температурі  $T=10$  К, передбачивши в ньому 40-процентний запас за критичним значенням температури  $T_k$  і магнітної індукції  $B_k$ . При цьому діаметр електропровідної частини надпровідного кабелю, яка може складатися з тонких дротів або плівок станіду ніобію, обмежений значенням  $D_k=5$  мм.

**Розв'язування.** Зона надпровідності станіду ніобію  $Nb_3Sn$ , як відомо, обмежена осями критичних значень температури  $T_k$  і магнітної індукції  $B_k$  та кривою  $B_k=f(T_k)$ . Ця крива у відносних одиницях ( $\underline{B}_k=B_k/B_{k0}$ ,  $\underline{T}_k=T_k/T_{k0}$ ) дуже близька до кола з одиничним радіусом, де  $B_{k0}=22$  Тл,  $T_{k0}=18$  К (рис. 3.12, б). Крива робочих значень магнітної індукції і температури у відносних одиницях, в яких за умовою завдання потрібно передбачити 40-процентний запас ( $\underline{B}=B/0,6B_{k0}$ ,  $\underline{T}=T/0,6T_{k0}$ ), також близька до кола з одиничним радіусом:

$$\left(\frac{B}{0,6 \cdot B_{k0}}\right)^2 + \left(\frac{T}{0,6 \cdot T_{k0}}\right)^2 = 1,$$

де  $T=10$  К – робоча температура надпровідника (задана за умовами завдання);

$B = 0,6 \cdot B_{k0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{T}{0,6 \cdot T_{k0}}\right)^2} = 0,6 \cdot 22 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{10}{0,6 \cdot 18}\right)^2} = 4,986$ Тл – робоча магнітна індукція як результат розв'язання цього рівняння.

При визначенні максимально можливого значення електричного струму  $I_{max}$  в кабелі потрібно виходити з найбільш критичної його частини, де магнітна індукція максимальна. Такою у надпровідному кабелі є дуже тонкий шар зовнішньої циліндричної поверхні його електропровідної частини, куди витісняється струм згідно з ефектом Мейснера і де робоча магнітна індукція  $B$  сягає свого максимуму за законом повного струму.

### 3.9 Контрольні запитання

1. Які головні функції здатний виконувати провідник електричного струму?
2. Які фактори впливають на питомий опір провідника?
3. Визначте основні відмінності провідника електричного струму від діелектрика.
4. Назвіть основні властивості провідникових матеріалів.
5. Як можна виміряти питомий опір провідника?
6. Яким фізичним законам підкоряється електричний струм у провіднику?
7. Чим обумовлена електропровідність провідника?
8. Назвіть головні причини виникнення активного і реактивного опорів. Коли можна використовувати термін “реактивний опір”?
9. Яким чином впливає частота електричного струму на активний і реактивний опори провідника?
10. Запропонуйте схему заміщення котушки індуктивності при електричному струмі високої частоти.
11. Поясніть явище емісії електронів з поверхні металу.
12. Що таке контактна різниця потенціалів?
13. Який існує зв'язок між контактною різницею потенціалів і ефектом Зеебека?
14. В яких випадках може виникнути термоелектрорушійна сила в замкненому електричному колі?
15. Назвіть відмінності між ефектами Зеебека і Пельтьє. Де можна на практиці використати ефекти Зеебека і Пельтьє?
16. Поясніть причини виникнення блукаючих струмів. Які негативні наслідки можуть бути від блукаючих струмів? Назвіть засоби зниження блукаючих струмів та їх потенціалів.
17. Які матеріали називають провідниками високої електропровідності?
18. Назвіть основні електропровідні сплави на основі міді.
19. Які переваги та недоліки має алюміній як провідник електричного струму порівняно з міддю?

20. Наведіть основні електропровідні сплави на основі алюмінію.
21. Яким вимогам повинен відповідати алюміній для його використання як кріопровідник?
22. Що являють собою надпровідники та які їх головні відмінності від звичайних провідників?
23. Поясніть сутність ефекту Мейснера в надпровідниках.
24. Яка фізична природа надпровідності?
25. Чим відрізняються між собою надпровідники першого та другого роду.
26. Опишіть практичну цінність надпровідників.
27. Які матеріали називають провідниками високого електричного опору?
28. Наведіть електропровідні сплави високого електричного опору на основі міді.
29. Які метали містять сплави для виготовлення електронагрівальних елементів?
30. Назвіть тугоплавкі метали та сферу їх використання.
31. В яких випадках доцільно використовувати благородні метали як провідники електричного струму?
32. Назвіть легкоплавкі метали та сферу їх використання.
33. Які неметалеві матеріали доцільно використовувати як провідники електричного струму?
34. Опишіть основні переваги та недоліки неметалевих провідників порівняно з металевими.
35. Що таке електричні щітки і в яких випадках вони використовуються?
36. Чим принципово відрізняються напівпровідники від провідників і діелектриків?
37. Наведіть причини значної залежності електропровідності напівпровідників від впливу енергетичних факторів (температури, світла, електричного поля).
38. Чим відрізняються між собою напівпровідники n-типу і p-типу?

39. Поясніть роль донорів і акцепторів при виготовленні напівпровідникових елементів.

40. Що таке діркова електропровідність напівпровідників?

41. Властивості яких р-п – переходів є найбільш корисними в процесі виготовлення напівпровідникових приладів?

42. Опишіть основні відмінності між діодом, варікапом і стабілітроном.

43. Яким чином проявляється керуваність р-п – переходів у транзисторі?

44. Назвіть основні відмінності між транзистором і тиристором.

## 4 МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

Всі матеріали в магнітному полі обов'язково вступають у взаємодію з ним і тому проявляють свої магнітні властивості. Цю взаємодію можна охарактеризувати силою Лоренца, оскільки будь-які матеріали містять рухомі заряджені частинки. Внаслідок цієї взаємодії заряджені частинки можуть змінити свій рух і таким чином вплинути на результуюче магнітне поле. Матеріали, які сприяють посиленню магнітного поля та концентрації магнітних силових ліній в певній зоні, називаються магнітними матеріалами. Ці властивості найбільш корисні в тих випадках, коли потрібно зв'язати магнітним полем електричні кола чи контури з метою створення в них електрорушійних сил Фарадея та сил Лоренца і Ампера – у трансформаторах, генераторах, двигунах, дроселях, котушках індуктивності та інших електромагнітних пристроях. До магнітних матеріалів відносяться феромагнітні кристалічні речовини (*феромагнетики*) і феримагнітні хімічні сполуки (*ферити*).

### 4.1 Фізичні процеси та явища в магнітних матеріалах

#### 4.1.1 Загальні властивості магнітних матеріалів

Магнітні властивості матеріалів обумовлені елементарними круговими струмами на мікроскопічному рівні, які здатні створювати власні магнітні поля (магнітні моменти  $M$ ), змінюватися під впливом зовнішнього магнітного поля і таким чином впливати на результуюче магнітне поле. До елементарних струмів належать в першу чергу обертання електронів навколо власних осей (електронні спіни) та орбітальні, обертання електронів в атомах (рис. 1.1). Магнітні моменти ядер на три порядки менше магнітних моментів електронних оболонок атомів, і тому магнітними моментами ядер зазвичай нехтують.

Намагнічений матеріал, що знаходиться в зовнішньому магнітному полі, створює своє власне магнітне поле, яке в ізотропних матеріалах спрямоване паралельно або антипаралельно зовнішньому полю. Тому магнітна індукція результуючого магнітного поля в матеріалі

визначається алгебраїчною сумою індукцій зовнішнього  $B_0$  і внутрішнього  $B_{вн}$  поля (1.21):

$$\begin{aligned} B &= B_0 + B_{вн} = \mu_0 H + \mu_0 J_M = \mu_0 \cdot (H + J_M) = \\ &= \mu_0 H \cdot (1 + k_M) = \mu_0 \mu_r H, \end{aligned} \quad (4.1)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля, яка створюється зовнішніми електричними струмами, А/м (1.20);

$B_0$  – магнітна індукція зовнішнього магнітного поля у вакуумі (без врахування впливу магнітного матеріалу), Тл;

$B_{вн}$  – магнітна індукція внутрішнього поля, яка обумовлена внутрішніми магнітними моментами (намагніченістю  $J_M$ ) магнітного матеріалу, Тл;

$J_M = \frac{M}{V} = k_M \cdot H$  – намагніченість магнітного матеріалу під впливом магнітного поля (векторна сума магнітних моментів  $M$  всіх атомів, які перебувають в одиниці об'єму  $V$  магнітного матеріалу), А/м [6];

$k_M = \mu_r - 1$  – магнітна сприйнятливість, яка характеризує здатність матеріалу змінювати свій магнітний момент під впливом зовнішнього магнітного поля;

$\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0}$  – відносна магнітна проникність матеріалу;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – абсолютна магнітна проникність вакууму (магнітна стала);

$\mu_a = \mu_r \cdot \mu_0$  – абсолютна магнітна проникність матеріалу, Гн/м.

#### **4.1.2 Класифікація матеріалів за їх здатністю намагнічуватись**

За здатністю намагнічуватись і впливати на результуюче магнітне поле всі матеріали поділяються на п'ять груп – *діамагнетики*, *парамагнетики*, *феромагнетики*, *антиферомагнетики* і *феримагнетики* [6].

*Діамагнетики* – матеріали, в яких атоми чи молекули не мають власного магнітного моменту. У них може існувати лише невеликий наведений магнітний момент протилежної спрямованості відносно зовнішнього магнітного поля, і тому може лише дещо ослаблювати його

( $k_M = -10^{-6} \dots 10^{-7} < 0$ ;  $0 < \mu_r < 1$ ). Негативне значення магнітної сприйнятливості  $k_M$  призводить до виштовхування діамагнетиків з магнітного поля. Діамагнетиками є більшість діелектриків і напівпровідників, ряд металів (мідь Cu, срібло Ag, золото Au, цинк Zn, ртуть Hg, галій Ga) і металоїдів (фосфор P, сірка S, кремній Si тощо), а також речовини в надпровідному стані.

**Парамагнетики** – матеріали, в яких атоми чи молекули за відсутності зовнішнього магнітного поля мають незначний власний магнітний момент, який виникає внаслідок деякої некомпенсованості спінових магнітних моментів електронів. Ці моменти практично не взаємодіють між собою, орієнтовані хаотично, і тому результуючий магнітний момент  $M=0$ . Під впливом зовнішнього поля магнітні моменти атомів орієнтуються в напрямі цього поля і тому дещо підсилюють його ( $k_M = 10^{-3} \dots 10^{-6}$ ;  $\mu_r > 1$ ). Парамагнетизм проявляється в лужних металах (натрій Na, калій K) і в деяких перехідних металах з недобудованою електронною оболонкою (титан Ti, ванадій V, хром Cr, марганець Mn).

**Феромагнетики** подібні до парамагнетиків, але спінові магнітні моменти їх електронів тісно взаємодіють між собою і утворюють магнітні домени об'ємом  $0,001 \dots 10 \text{ мм}^3$ . Домени знаходяться в стані магнітного насичення завдяки однакової орієнтації магнітних моментів усіх його атомів. Доменна структура формується за відсутності зовнішнього магнітного поля внаслідок самовільної (спонтанної) намагніченості при температурі нижче  $T_K$  (точки Кюрі). Наприклад, для чистого заліза  $T_K = 768^\circ\text{C}$ , для нікелю  $T_K = 358^\circ\text{C}$ , для кобальту  $T_K = 1131^\circ\text{C}$ . За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів орієнтовані майже хаотично, і тому їх результуючий магнітний момент майже нульовий. Але під впливом зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів легко орієнтуються в напрямку цього поля і в багато разів підсилюють його, знаходячись у сильній залежності від напруженості зовнішнього магнітного поля ( $k_M \approx \mu_r = 10^2 \dots 10^6$ ). При цьому домени додатково намагнічуються, збільшуючись у своїх розмірах. До феромагнетиків відносяться три перехідні метали з недобудованою електронною оболонкою і сплави на їх основі (залізо Fe, нікель Ni і кобальт Co), а також деякі рідкоземельні елементи, які не набули широкого використання як феромагнетики через дуже низькі значення  $T_K$ .



**Антиферомагнетики** – матеріали, в яких атоми, як і в парамагнетиках та феромагнетиках, мають власний магнітний момент. Але під впливом зовнішнього магнітного поля і внаслідок обмінної взаємодії магнітні моменти отримують протилежну орієнтацію і майже повністю компенсують один одного ( $k_M=10^{-3}...10^{-5}$ ). До антиферомагнетиків відноситься доволі велика кількість сполук на основі марганцю Mn, хрому Cr, нікелю Ni і ванадію V.

**Феримагнетики (ферити)** – кристалічні матеріали з доменною структурою. Їх домени складаються з двох і більше неоднакових магнітних підрешіток, які зв'язані між собою антипаралельно (антиферомагнітно). У результаті з'являється відмінна від нуля різниця магнітних моментів підрешіток, що призводить до спонтанного намагнічування кристалів. Таким чином, ферити можна розглядати як некомпенсовані антиферомагнетики. За своїми магнітними властивостями ферити поступаються феромагнетикам у магнітній індукції насичення, але мають значно більший питомий опір  $\rho$ , який може сягати  $10^{11}$  Ом·м. Високий питомий опір практично виключає у феритах вихрові струми, що дозволяє використовувати їх у високочастотних магнітних полях. Ферити є складною системою окислів металів із загальною хімічною формулою  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , де MeO – окисел двовалентного металу.

#### **4.1.3 Намагнічування магнітних матеріалів**

Процес намагнічування магнітних матеріалів (феромагнетиків та феритів) під впливом зовнішнього магнітного поля супроводжується зміщенням границь доменів, поворотом їх магнітних моментів у напрямку дії зовнішнього магнітного поля та збільшенням одних доменів за рахунок інших – аж до стану повного магнітного насичення [5]. У цьому стані практично всі монокристали стають однодоменими, незмінними за своїми лінійними розмірами і орієнтованими в напрямку дії зовнішнього магнітного поля.

**Магнітострикція** – явище зміни лінійних розмірів феромагнітних монокристалів у процесі намагнічування магнітного матеріалу. Це явище характеризується константою магнітострикції  $\lambda_s = \frac{\Delta l}{l}$  – зміною довжини зразка магнітного матеріалу відносно довжини  $l$  цього зразка. Якщо зразок матеріалу подовжується в напрямку дії магнітного поля

за рахунок скорочення перпендикулярно напрямку дії магнітного поля, то знак величини  $\lambda_s$  позитивний, а якщо навпаки – негативний. Величина  $\lambda_s$  і навіть її знак залежать від напруженості  $H$  магнітного поля. З трьох основних феромагнетиків найбільша магнітострикція виникає в нікелю ( $\lambda_s = -3,7 \cdot 10^{-5}$ ). Дуже висока магнітострикція виникає в рідкоземельних елементах – у тербію Tb, диспрозію Dy, гольмію Ho, ербію Er, тулію Tm. Наприклад, у полікристалічного тербію  $\lambda_s = 3 \cdot 10^{-3}$ , а у монокристалічного  $\lambda_s = 2 \cdot 10^{-2}$  [6]. Магнітострикція використовується в перетворювачах ультразвуку, в яких енергія змінного магнітного поля перетворюється в енергію механічних коливань (або навпаки).

Явище магнітострикції, як і багато інших, може бути зворотним, тобто механічна деформація феромагнетика змінює його намагніченість. Це явище має назву магнітопружний ефект або ефект Віллари. Цей ефект покладений в основу роботи магнітопружних перетворювачів (тензодатчиків). У них використовується залежність зміни магнітної проникності  $\Delta\mu_r$  або магнітної індукції  $\Delta B$  від механічних напружень та зусиль. Чутливість магнітопружного матеріалу характеризується

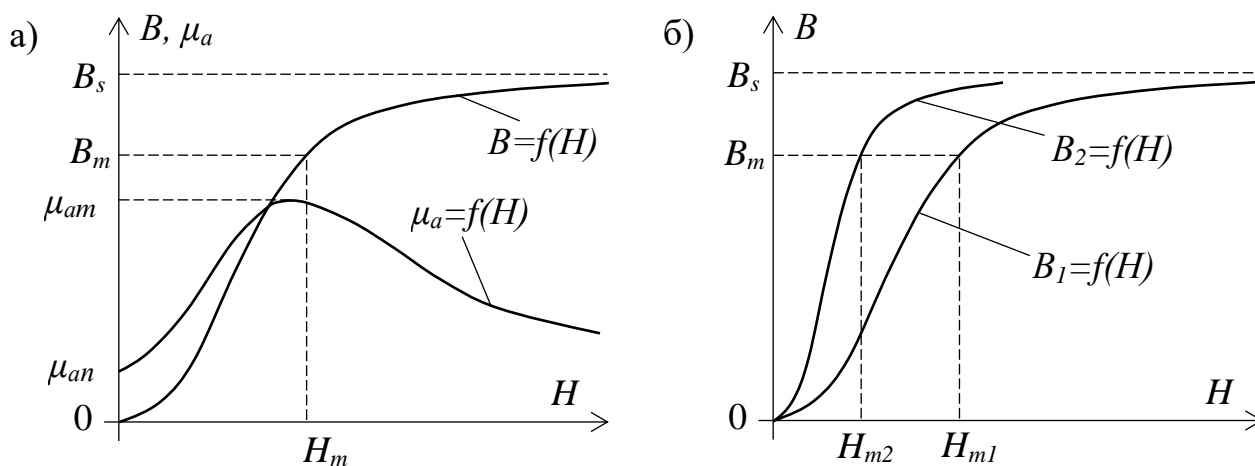
коєфіцієнтом тензочутливості  $K_T = \frac{(\Delta\mu_r)}{\mu_r \lambda_s}$ , де  $\lambda_s = \frac{\Delta l}{l}$  – константа магнітострикції. Коєфіцієнт тензочутливості досягає значення 300.

**Магнітна анізотропія** – залежність властивостей магнітного матеріалу від вибраного напрямку. Її причина полягає в анізотропному характері магнітної взаємодії між атомними–носіями магнітного моменту. Особливо велика магнітна анізотропія виникає у монокристалах феромагнетиків. Вона проявляється в наявності осей найбільш легкого намагнічування, які характеризуються максимальними значеннями магнітної сприйнятливості  $k_M$  (4.1) і мінімальними витратами електричної енергії на процес намагнічування. За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів самовільно (спонтанно) орієнтуються вздовж однієї з осей легкого намагнічування. При зростанні температури ефект магнітної анізотропії слабне, а при температурі вище точки Кюрі  $T_K$  – зовсім зникає. Ефект анізотропії використовують при виготовленні тонких листів електротехнічної сталі шляхом їх холодної прокатки. У такому процесі вісь легкого намагнічування співпадає з напрямом прокатки. Використання холоднокатаних листів електротехнічної

сталі в магнітопроводах трансформатора суттєво знижує витрати електричної енергії на створення в ньому робочої магнітної індукції.

### **Основна крива намагнічування магнітних матеріалів**

Процес намагнічування магнітних матеріалів характеризують основною (статичною) кривою намагнічування  $B=f(H)=\mu_a \cdot H$  (1.21), де  $B = \frac{d\Phi}{dS}$  – магнітна індукція або густина магнітного потоку  $\Phi$  (1.16);  $dS$  – елементарна площа поперечного перерізу магнітних силових ліній;  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність магнітного матеріалу;  $H$  – напруженість магнітного поля в певній точці магнітного матеріалу, яка залежить від намагнічувальної (магніторушійної) сили  $F$  зовнішніх струмів  $i_k$ . Криві намагнічування  $B=f(H)$  подібні для всіх магнітних матеріалів і мають нелінійний характер (рис.4.1), де  $B_s$  – магнітна індукція насичення;  $B_m$  – максимальна (робоча) магнітна індукція, яка зазвичай вибирається на  $\approx 35\%$  менше індукції насичення ( $B_m \approx 0,65 \cdot B_s$ ) для зменшення негативного впливу нелінійного характеру кривої  $B=f(H)$ .



**Рисунок 4.1 – Залежності магнітної індукції  $B=f(H)$  та абсолютної магнітної проникності  $\mu_a=f(H)$**

Основну криву намагнічування  $B=f(H)$  можна визначити експериментально, якщо процес намагнічування починати зовсім з розмагніченого стану магнітного матеріалу і поступово збільшувати напруженість  $H$  до стану насичення матеріалу.

Залежність абсолютної магнітної проникності від напруженості магнітного поля  $\mu_a = \frac{B}{H} = f(H)$  також має нелінійний характер (рис.4.1, а), де  $\mu_{an}$  – початкова абсолютна магнітна проникність при  $H=0$ ;  $\mu_{am}$  – максимальне значення магнітної проникності. Для розуміння важливості магнітної проникності можна порівняти дві криві намагнічування  $B_1=f(H)$  і  $B_2=f(H)$  (рис. 4.1, б). Крива  $B_2=f(H)$  з більшим значенням  $\mu_a$  має перевагу над кривою  $B_1=f(H)$ , тому що потребує меншу напруженість магнітного поля ( $H_{m2}<H_{m1}$ ), а значить менше витрат електроенергії для отримання робочої індукції  $B_m$  при інших рівних умовах.

Абсолютна магнітна проникність  $\mu_a$  знижується з підвищенням частоти змінного магнітного поля через інерційність магнітних процесів [5]. У сильних магнітних полях (при дуже великих значеннях  $H$ )  $\mu_a$  знижується суттєво і навіть може навіть наблизитися до магнітної проникності вакууму  $\mu_0$ . Стрибкоподібне зниження  $\mu_a$  до  $\mu_0$  відбувається при підвищенні температури феромагнетика вище точки Кюрі.

Важливою характеристикою феромагнетиків при їх використанні в змінних магнітних полях є :

$$\mu_{a\sim} = \frac{B_m}{H_m} \approx \text{const}, \quad (4.2)$$

де  $B_m, H_m$  – амплітудні значення індукції і напруженості магнітного поля.

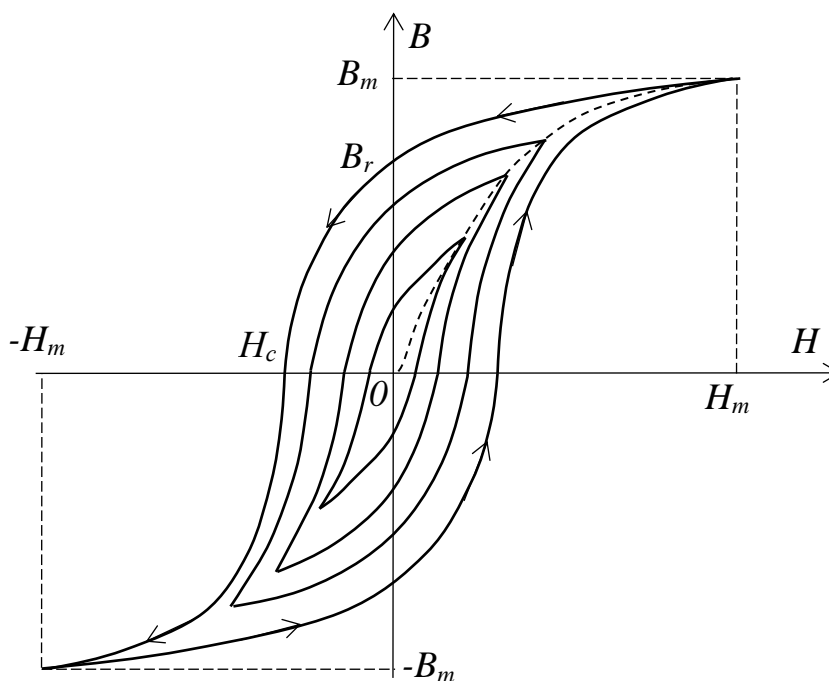
При аналізі роботи та проектуванні електротехнічних пристроїв змінного електричного струму динамічну магнітну проникність  $\mu_{a\sim}$  часто приймають постійною ( $\mu_{a\sim}=\text{const}$ ) і незалежною від  $H$ , особливо, якщо амплітудне значення магнітної індукції  $B_m$  вибране значно меншим за індукцію насичення  $B_s$  [11].

#### **4.1.4 Перемагнічування магнітних матеріалів**

##### ***Магнітний гістерезис***

Якщо повільно намагнічувати феромагнетик, а потім зменшувати напруженість магнітного поля  $H$  від будь-якої точки основної кривої

намагнічування (рис. 4.1), то індукція  $B$  буде зменшуватися, не за основною кривою намагнічування, а з деяким відставанням. Це явище називається магнітним гістерезисом. Внаслідок цього явища графік залежності  $B=f(H)$  після закінчення повного циклу перемагнічування має вигляд статичної петлі гістерезису. Змінюючи напругу магнітного поля, можна одержати ряд петель гістерезису, як це наведено на рис. 4.2.



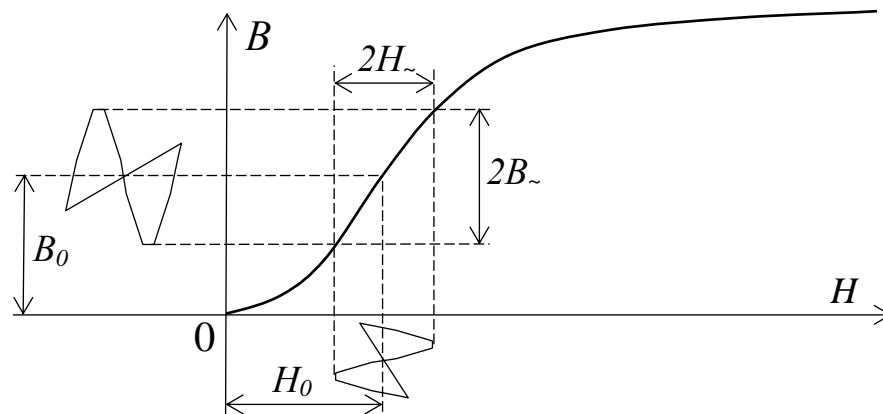
**Рисунок 4.2 – Загальний вигляд статичних петель магнітного гістерезису у феромагнетиках**

Петля гістерезису при максимальній індукції  $B=B_m$ , близькій до індукції насичення  $B_s$ , називається граничною петлею гістерезису. Значення  $B$ , яке залишилось при  $H=0$  в процесі розмагнічування матеріалу зі стану насичення, називається залишковою індукцією  $B_r$ . Для доведення значення індукції від  $B_r$  до нуля необхідно створити зворотну за напрямом дії напруженість  $H_c$ , яка зветься коерцитивною силою. Гістерезисні петлі симетричні відносно початку координат, якщо відсутні постійні складові напруженості магнітного поля  $H_0$  або струму намагнічування  $I_0$ .

Інколи магнітні матеріали використовують в змінному магнітному полі при одночасному підмагнічуванні постійним магнітним полем напруженістю  $H_0$ . У цих випадках процес перемагнічування

характеризують частковим гістерезисним циклом (рис. 4.3) з амплітудними значеннями напруженості  $H_{\sim}$  і магнітної індукції  $B_{\sim}$ , а властивості феромагнетиків - диференціальною магнітною проникністю  $\mu_{ad}$ , яка залежить від  $H_0$ :

$$\mu_{ad} = \frac{B_{\sim}}{H_{\sim}} = f(H_0). \quad (4.3)$$



**Рисунок 4.3 – Крива підмагнічування феромагнетиків постійним магнітним полем**

На основі залежності  $\mu_{ad}=f(H_0)$  працюють магнітні підсилювачі. В деяких випадках, наприклад, при живленні намагнічувальної обмотки від електронного інвертора, постійна складова напруженості  $H_0$  може виникнути самовільно.

### ***Магнітні втрати***

Наявність коерцитивної сили  $H_c$  у гістерезисній петлі (рис. 4.2) означає втрату енергії за кожний цикл статичного перемагнічування феромагнетика, яка пропорційна площі цієї петлі  $S_{\Gamma}$ . Втрати потужності на гістерезис  $P_{\Gamma}$  можна визначити за емпіричною формулою [5]

$$P_{\Gamma} = \eta \cdot f \cdot B_m^n \cdot V, \quad (4.4)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, який залежить від властивостей матеріалу;

$B_m$  – амплітуда магнітної індукції;

$n = 1,6 \dots 2,0$  – показник ступені;

$f$  – циклічна частота струму;

$V$  – обсяг зразка феромагнетика.

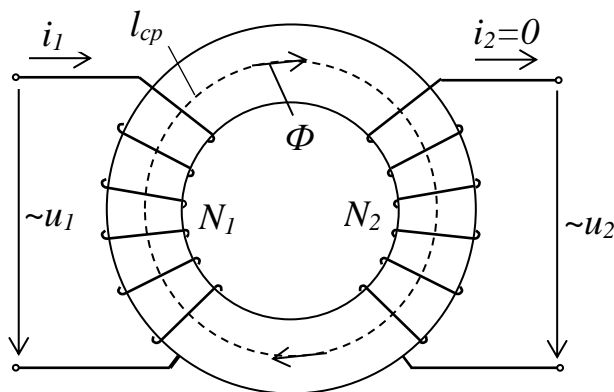
При змінному магнітному полі, окрім втрат на гістерезис, виникають додаткові втрати від вихрових струмів у феромагнетику, а також внаслідок, так званої, магнітної післядії або магнітної в'язкості матеріалу. Тому при експериментальному визначенні магнітних втрат краще користуватися динамічними гістерезисними петлями, які являють собою залежність миттєвих значень магнітної індукції  $B$  від миттєвих значень напруженості магнітного поля  $H$ . Динамічні гістерезисні петлі дещо ширші (мають більше значення  $H_c$ ) порівняно зі статичними петлями магнітного гістерезису (рис. 4.2). Втрати електричної потужності на вихрові струми  $P_f$  суттєво залежать від частоти магнітного поля та електропровідності феромагнетику. Ці втрати можна визначити за емпіричною формулою [5]

$$P_f = \xi \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot V, \quad (4.5)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт, який залежить від типу і форми феромагнетику, а також від його питомого електричного опору  $\rho$  (3.1).

#### ***Залежність магнітної індукції від напруги джерела живлення***

Розглянемо процес перемагнічування феромагнетиків на прикладі перемагнічування магнітопроводу ненавантаженого однофазного трансформатора. Його первинна обмотка з числом витків  $N_1$  підключена до джерела змінної напруги  $u_1$ , яка у звичайних ситуаціях змінюється за синусоїдальним законом  $u_1 = U_m \cdot \sin \omega t$  (рис. 4.4).



**Рисунок 4.4 – Поперечний переріз ненавантаженого однофазного трансформатора**

Обмотка  $N_1$  зі струмом  $i_1$  разом з магнітопроводом є по суті котушкою індуктивності з феромагнітним осердям (дроселем), враховуючи відсутність струму навантаження  $i_2$  у вторинній його обмотці  $N_2$ .

Припустимо, що електричний струм  $i_1$ , магнітний потік  $\Phi$  і магнітна індукція  $B$  змінюються за синусоїдальним законом, як і напруга  $u_1$ . Припустимо також, що динамічна магнітна проникність  $\mu_a$  феромагнетику згідно з формулою (4.2) постійна ( $\mu_a = \text{const}$ ) і достатньо велика, завдяки чому практично всі магнітні силові лінії сконцентровані в магнітопроводі, тобто магнітний потік розсіювання  $\Phi_\sigma$  за межами магнітопроводу відсутній ( $\Phi_\sigma \approx 0$ ). Тоді згідно із законом електромагнітної індукції Фарадея (1.22) електрорушійна сила (ЕРС) у первинній обмотці трансформатора

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d}{dt} (B_m S \cdot \sin \omega t) = \\ &= -B_m 2\pi f N_1 S \cdot \cos \omega t = -E_{m1} \cos \omega t, \end{aligned} \quad (4.6)$$

де  $\Phi \approx \Phi_m \cdot \sin \omega t = B_m S \cdot \sin \omega t$  – магнітний потік у магнітопроводі, який пронизує витки обмоток  $N_1$  і  $N_2$  трансформатора і змінюється практично за синусоїдальним законом, Вб;

$B_m = \frac{\Phi_m}{S}$  – амплітуда магнітної індукції, Тл;

$S$  – площа поперечного перерізу магнітопроводу, м<sup>2</sup>;

$\omega = 2\pi f$  – кутова частота зміни електричного струму і магнітного потоку, 1/с;

$f$  – циклічна частота зміни електричного струму і магнітного потоку, Гц;

$E_{m1} = B_m 2\pi f N_1 S$  – амплітуда ЕРС у первинній обмотці трансформатора, В.

Якщо знехтувати падінням напруги на активному опорі первинної обмотки, то з виразу (4.6) впливає така формула розрахунку діючих (ефективних) значень напруги в обмотках трансформатора:

$$U_1 \approx \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = 4,44 B_m f N_1 S; \quad U_2 \approx \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = U_1 \frac{N_2}{N_1} = 4,44 B_m f N_2 S. \quad (4.7)$$



Важливо відзначити, що напруга  $U_1$  (4.7) задається джерелом змінного струму і не залежить від магнітної індукції  $B$ , струму  $i_1$  або напруженості  $H$  магнітного поля. Тому напруженість  $H$  на кривій намагнічування  $B=f(H)$  (рис. 4.1) необхідно розглядати як наслідок магнітної індукції  $B$ , яка задається напругою  $U_1$  і прямо пропорційна цій напрузі (4.7). Суттєво нелінійна взаємозалежність  $B$  і  $H$  стає принципово важливою на ділянці насичення феромагнетиків (рис. 4.1). На цій ділянці незначному збільшенню напруги  $\Delta U_1$ , а значить і магнітної індукції  $\Delta B$ , відповідає суттєве (інколи багаторазове) збільшення напруженості магнітного поля  $\Delta H$  і електричного струму  $\Delta I_1$  у намагнічувальній обмотці. А це означає небезпеку виходу з ладу трансформатора.

## 4.2 Вимірювання основних параметрів магнітних матеріалів

Під основними параметрами феромагнетиків маються на увазі магнітна проникність, магнітні втрати і магнітний опір. Найбільш простий варіант схеми вимірювання цих параметрів наведений на рис. 4.5.

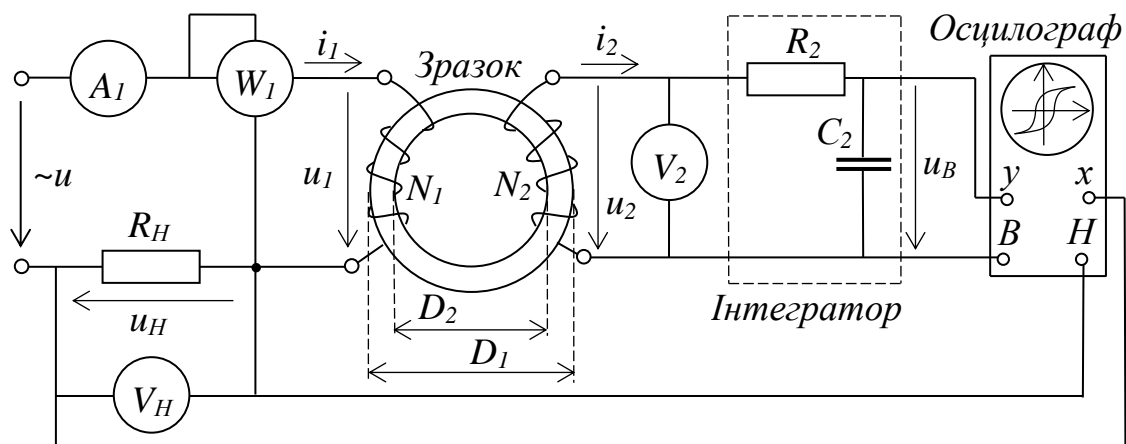


Рисунок 4.5 – Схема вимірювання основних параметрів феромагнетиків

Магнітний потік  $\Phi$  та індукція  $B$  у зразку феромагнетика створюється змінним електричним струмом  $i_1$  у первинній (намагнічувальній) обмотці  $N_1$ , яка підключена до джерела синусоїдальної напруги  $u = U_m \sin \omega t$ . За допомогою шунта з невеликим опором  $R_H$  створюється падіння напруги  $u_H$ , яке прямо пропорційне струму  $i_1$  і напруженості магнітного поля  $H$  та подається на вхід “ $x$ ” осцилографа. Активна

потужність, яка споживається первинною обмоткою  $N_1$ , вимірюється ватметром  $W_1$ . Діюче значення струму  $i_1$  вимірюється амперметром  $A_1$ . Закон зміни цього струму відхиляється від синусоїдального закону через нелінійність кривої намагнічування феромагнетика  $B(H)$ . Тому для визначення амплітуди цього струму  $I_{m1}$  та напруженості магнітного поля  $H_m$  в схемі (рис. 4.5) використовується амплітудний вольтметр  $V_H$ , підключений до шунта  $R_H$ .

Вторинна обмотка  $N_2$  використовується для отримання напруги  $u_2$ , яка, згідно з виразом (1.24), пропорційна швидкості зміни (похідній) магнітної індукції, тобто:

$$u_2 = -e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (4.8)$$

де  $S=0,5 \cdot (D_1 - D_2) \cdot h$  – площа поперечного перерізу зразка феромагнетика,  $m^2$ ;

$h$  – товщина зразка феромагнетика,  $m$ ;

$N_2$  – число витків вторинної обмотки.

Діюче значення цієї напруги вимірюється вольтметром  $V_2$ . Напряга  $u_2$  інтегрується  $RC$ -інтегратором для формування напруги  $u_B$ , прямо пропорційної миттєвому значенні магнітної індукції  $B$  (4.8), і далі подається на вхід “ $y$ ” осцилографа.

Таким чином, на входах “ $x$ ” і “ $y$ ” осцилографа формуються електричні напруги  $u_H$  і  $u_B$ , прямо пропорційні миттєвим значенням напруженості магнітного поля  $H$  і магнітної індукції  $B$ . Це дозволяє отримати на екрані осцилографа динамічну петлю магнітного гістерезису  $B(H)$  і за нею визначити основні властивості чи параметри феромагнетика.

#### **4.2.1 Визначення магнітної проникності за показаннями приладів**

За показаннями електровимірювальних приладів (рис. 4.5) можна визначити амплітудні значення напруженості  $H_m$  магнітного поля і магнітної індукції  $B_m$  у зразку феромагнетика, що досліджується для подальшого розрахунку динамічної магнітної проникності  $\mu_a$  (4.2).

Амплітуда напруженості  $H_m$  визначається відповідно до закону повного струму (1.20) за показаннями вольтметра  $V_H$ , який реагує на амплітуду напруги на шунті  $R_H$ :

$$H_m = \frac{I_{m1} \cdot N_1}{l} = \frac{U_{mH} \cdot N_1}{R_H l}, \quad (4.9)$$

де  $I_{m1}$  – амплітуда змінного струму  $i_1$  в намагнічувальній (первинній) обмотці  $N_1$ ;

$N_1$  – число витків первинної обмотки;

$l = \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2}$  – середня довжина магнітних силових ліній зразка феромагнетика, виготовленого у формі кільця;

$D_1, D_2$  – зовнішній і внутрішній діаметри зразка феромагнетика;

$U_{mH} = I_{m1} \cdot R_H$  – амплітуда напруги на шунті  $R_H$  (показання вольтметра  $V_H$ ).

Амплітуда магнітної індукції  $B_m$  розраховується відповідно до закону електромагнітної індукції (1.22) на основі формули (4.7) за показаннями вольтметра  $V_2$ , який реагує на діюче значення напруги  $U_2$  на вторинній обмотці:

$$B_m = \frac{U_2}{4,44 f N_2 S}. \quad (4.10)$$

Результати розрахунків  $H_m$  і  $B_m$  за формулами (4.9) і (4.10) дозволяють визначити динамічну магнітну проникність

$$\mu_{a\sim} = \frac{B_m}{H_m}. \quad (4.2)$$

#### **4.2.2 Визначення магнітних втрат за площею петлі гістерезису**

Площа динамічної петлі гістерезису  $S_H$ , отриманої за допомогою осцилографа, характеризує втрачену енергію в одиниці об'єму  $V$  феромагнетика за кожний цикл його перемагнічування. Тому потужність магнітних втрат  $P_M$  (Вт) можна визначити за такою формулою:

$$P_M = P_\Gamma + P_f = S_\Gamma \cdot f \cdot m_B \cdot m_H \cdot V, \quad (4.11)$$

де  $S_\Gamma$  – площа динамічної петлі гістерезису на екрані осцилографа, мм<sup>2</sup>;

$f$  – циклічна частота перемагнічування феромагнетика, Гц;

$m_B = \frac{B_m}{l_{ym}}$  – масштаб за віссю ординат (масштаб магнітної індукції), Тл/мм;

$l_{ym}$  – відхилення променя осцилографа за віссю ординат відповідно до амплітуди магнітної індукції  $B_m$  (4.10), мм;

$m_H = \frac{H_m}{l_{xm}}$  – масштаб за віссю абсцис осцилографа (масштаб напруженості магнітного поля), А/м/мм;

$l_{xm}$  – відхилення променя осцилографа за віссю абсцис відповідно до амплітуди напруженості магнітного поля  $H_m$  (4.9), мм;

$V = 0,25 \cdot \pi \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot h$  – об'єм зразка феромагнетика, м<sup>3</sup>.

Питомі магнітні втрати (Вт/кг)

$$p_M = \frac{P_M}{m} = \frac{S_\Gamma \cdot f \cdot m_B \cdot m_H \cdot V}{m} = \frac{S_\Gamma \cdot f \cdot m_B \cdot m_H}{d}, \quad (4.12)$$

де  $m = d \cdot V$  – маса зразка феромагнетика, кг;

$d$  – щільність феромагнетика, кг/м<sup>3</sup>.

Регулюючи напругу  $u$  на обмотці  $N_I$  (рис. 4.5), можна отримати сімейство гістерезисних петель (рис. 4.2) та побудувати за ними основну криву намагнічування, яка зображена на рис. 4.2 пунктирною лінією, а також залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля  $\mu_a = f(H)$ , як це зображено на рис. 4.1, а. Далі за допомогою залежності  $\mu_a = f(H)$  у разі необхідності можна розрахувати інші значення магнітної проникності – початкову  $\mu_{an}$ , максимальну  $\mu_{am}$  і диференціальну  $\mu_{ad}$  (4.3).

### **4.2.3 Визначення магнітних втрат за показаннями приладів**

Схема, зображена на рисунку 4.5, дозволяє для порівняння визначити ті ж самі властивості феромагнетика, але без використання осцилографа. Зокрема, магнітні втрати  $P_M$  (Вт) можна визначити за показаннями ватметра  $P_{W1}$  і амперметра  $A_I$ , тобто як

$$P_M = P_\Gamma + P_f = P_{W1} - I_1^2 R_1, \quad (4.13)$$

де  $R_1$  – активний опір первинної обмотки  $N_1$ .

Питомі магнітні втрати (Вт/кг) розраховуються за формулою

$$p_M = \frac{P_M}{m} = \frac{P_M}{d \cdot V}. \quad (4.14)$$

#### **4.2.4 Вимірювання комплексного магнітного опору**

При розрахунках магнітопроводів часто використовують методи, аналогічні методам розрахунків електричних кіл синусоїдального струму. Зокрема, користуються символічним методом розрахунку, де задіяні комплексні числа, в основі яких лежить синусоїдальний закон зміни напруги  $u = U_m \sin \omega t$  джерела живлення та характерних величин ферромагнетиків. Для цього вводять поняття комплексного магнітного опору магнітопроводу, замінюючи магнітну індукцію  $B$  і напруженість  $H$  магнітного поля еквівалентними синусоїдальними функціями часу  $t$  ( $B = B_m \sin \omega t$  і  $H = H_m \sin \omega t$ ).

#### ***Еквівалентна петля гістерезису***

При синусоїдальній напрузі  $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$  (рис. 4.5), коли магнітна індукція в магнітопроводі також практично синусоїдальна, за амплітуду  $B_m$  її еквівалентної синусоїди  $B = B_m \sin \omega t$  вибирають реальну амплітуду  $B_m$  ( $B_m = B_m$ ). Амплітуду  $H_m$  еквівалентної синусоїди  $H = H_m \sin \omega t$  напруженості магнітного поля доцільно вибрати з урахуванням рівності магнітних втрат. Для цього динамічну петлю гістерезису  $B(H)$  замінюють еквівалентним еліпсом з такою самою площею (рис. 4.6).

При цьому амплітуду  $H_m$  еквівалентної синусоїди напруженості магнітного поля і магніторушійної сили (МРС)  $F_m$  можна визначити через діюче значення  $I_1$  еквівалентної синусоїди намагнічувального струму  $i_1$  (показання амперметра  $A_1$  в схемі на рис. 4.5):

$$H_m = \frac{\sqrt{2} I_1 N_1}{l}; F_m = \sqrt{2} I_1 N_1. \quad (4.15)$$

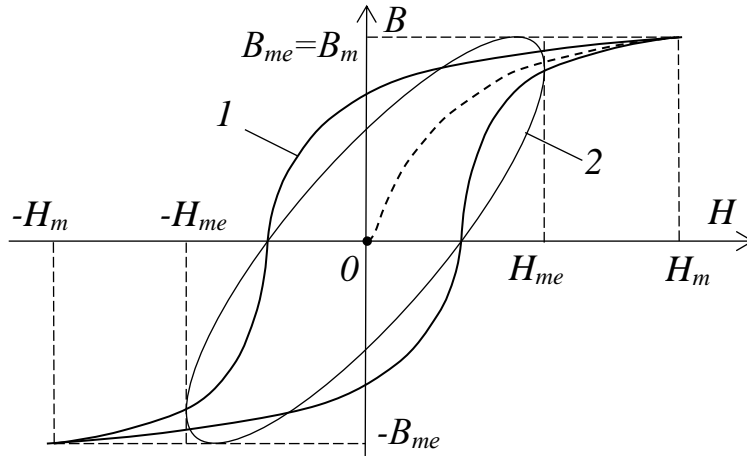


Рисунок 4.6 – Динамічна петля гістерезису (1) та еквівалентний еліпс (2)

### Схема заміщення котушки з феромагнітним осердям

Після введення еквівалентних синусоїд котушку індуктивності з феромагнітним осердям (рис. 4.5) можна вважати лінійним елементом для конкретної незмінної за величиною напруги, побудувати векторну діаграму котушки і, відповідно, представити схему її заміщення (рис. 4.7).

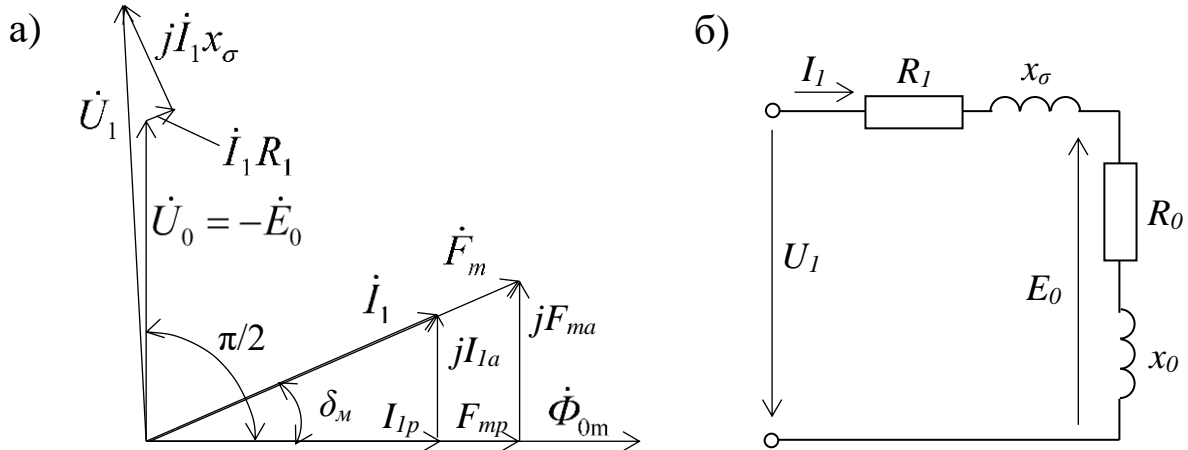


Рисунок 4.7 – Векторна діаграма (а) і схема заміщення (б) котушки з осердям

У схемі заміщення котушки з феромагнітним осердям та на векторній діаграмі котушки використані такі позначення:

$R_1$  – активний опір котушки або намагнічувальної обмотки  $N_1$ , який враховує нагрів цієї обмотки електричним струмом  $I_1$ , Ом (рис. 4.5);

$R_0 = \frac{P_M}{I_1^2} = \frac{U_0 \cdot I_{1a}}{I_1^2}$  – активний опір, Ом, який враховує магнітні втрати  $P_M$  у феромагнітному осерді котушки (4.13);

$I_1$  – діюче значення намагнічувального струму (показання амперметра  $A_1$  в схемі на рис. 4.5), який спричиняє напруженість магнітного поля амплітудою  $H_{me}$  і магніторушійну силу (МРС) амплітудою  $F_m$  (4.15);

$U_0 = \frac{U_2 \cdot N_1}{N_2}$  – основна складова прикладеної до котушки напруги  $U_1$  (4.6), яка зрівноважує ЕРС  $E_0$ , знаходиться з нею в протифазі і випереджає вектор основного магнітного потоку  $\Phi_{0m}$  за фазою на кут  $\pi/2$  (рис. 4.7);

$N_1, N_2$  – число витків первинної і вторинної обмоток (рис. 4.5);

$I_1 R_1, I_1 x_\sigma$  – інші складові напруги  $U_1$  (рис. 4.7);

$I_{1a} = \frac{P_M}{U_0}$  – активна складова струму  $I_1$ , яка зумовлена магнітними втратами  $P_M$  і спричиняє активну складову МРС  $F_{ma} = F_m \cdot \sin \delta_m$  (рис. 4.7, а);

$I_{1p} = \sqrt{I_1^2 - I_{1a}^2}$  – реактивна складова струму  $I_1$ , яка спричиняє реактивну складову МРС  $F_p = F_m \cdot \cos \delta_m$  і основний магнітний потік  $\Phi_{0m}$  (рис. 4.7, а);

$U_2$  – діюча напруга на вторинній обмотці  $N_2$  (показання вольтметра  $V_2$ );

$\delta_m$  – фазовий кут відставання магнітного потоку  $\Phi_{0m}$  від струму  $I_1$  та МРС  $F_m$  (кут магнітних втрат), який зумовлений магнітними втратами  $P_M$ ;

$\Phi_{0m} = B_m S$  – амплітуда основної частини магнітного потоку (Вб), що замикається у феромагнітному осерді та викликає в намагнічувальній обмотці електрорушійну силу (ЕРС)  $E_0$  (його комплексна амплітуда позначена на векторній діаграмі як  $\dot{\Phi}_{0m}$ );

$B_m = \frac{U_2}{(4,44 f N_2 \cdot S)}$  – амплітуда магнітної індукції в осерді (4.7), Тл;

$S$  – площа поперечного перерізу феромагнітного осердя, м<sup>2</sup>;

$f$  – циклічна частота зміни магнітного потоку, Гц;

$x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}, z_0 = \frac{U_0}{I_1}$  – індуктивний і повний опори котушки, Ом, зумовлені основним магнітним потоком  $\Phi_{0m}$  (без врахування  $R_1$ );

$x_\sigma = -x_0 + \sqrt{z^2 - (R_1 + R_0)^2}$  – індуктивний опір котушки, Ом, який зумовлений магнітним потоком розсіювання  $\Phi_\sigma$ ;

$z = \frac{U_1}{I_1}$  – повний опір котушки з феромагнітним осердям.

### **Визначення комплексного питомого магнітного опору**

Для визначення магнітного опору скористаємося законом Ома для магнітного кола, який аналогічний закону Ома для електричних кіл:

$$Z_M = \frac{\dot{F}_m}{\dot{\Phi}_{0m}} = \frac{H_{me} \cdot l}{\dot{B}_m \cdot S} = |Z_M| e^{j\delta_m} = \dot{\rho}_Z \frac{l}{S} = (\rho_R + j\rho_X) \frac{l}{S} = R_M + jX_M, \quad (4.16)$$

де  $Z_M$  – комплексний магнітний опір, 1/Гн;

$$|Z_M| = \frac{F_m}{\Phi_{0m}} – \text{модуль комплексного магнітного опору, 1/Гн;}$$

$\dot{F}_m$  – комплексна амплітуда магніторушійної сили, А, модуль якої згідно із законом повного струму  $F_m = \sqrt{2} I_1 \cdot N_1 = H_{me} \cdot l$  (4.15);

$\dot{\Phi}_{0m}$  – комплексна амплітуда основної частини магнітного потоку, Вб;

$l = \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2}$  – середня довжина магнітних силових ліній зразка феромагнетика, виготовленого у формі кільця (рис. 4.5);

$$I_{1a} = \frac{P_M}{U_0} – \text{активна складова струму } I_1, \text{ яка зумовлена магнітними}$$

втратами  $P_M$  і спричиняє активну складову МРС  $F_{ma} = F_m \sin \delta_m = \sqrt{2} I_{1a} \cdot N_1$ ;

$$P_M = P_{W1} - I_1^2 R_1 – \text{магнітні втрати (4.13), Вт;}$$

$P_{W1}$  – активна потужність, яку споживає котушка з феромагнітним осердям (показання ватметра  $W_1$  в схемі на рис. 4.5);

$$X_M = \frac{F_{ma}}{\Phi_{0m}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{1a} \cdot N_1}{\Phi_{0m}} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_M \cdot N_1}{\Phi_{0m} \cdot U_0} = \frac{P_M}{\Phi_{0m}^2 \pi \cdot f} = |Z_M| \sin \delta_m – \text{уявна скла-$$

дова магнітного опору, 1/Гн;

$$R_M = \frac{F_{mp}}{\Phi_{0m}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{1p} \cdot N_1}{\Phi_{0m}} = \sqrt{|Z_M|^2 - X_M^2} = |Z_M| \cos \delta_m – \text{дійсна скла-$$

дова магнітного опору, 1/Гн;

$$\dot{\rho}_Z = Z_M \frac{S}{l} = \frac{\dot{H}_{me}}{\dot{B}_m} = \frac{1}{\dot{\mu}_{a\sim}} = \rho_Z \cdot e^{j\delta_m} – \text{комплексний питомий магніт-}$$

тний опір;

$\dot{\mu}_{a\sim}$  – комплексна динамічна магнітна проникність феромагнетика, Гн/м;

$$\rho_Z = \frac{H_{me}}{B_m} = \frac{\sqrt{2} I_1 N_1}{l B_m} = \sqrt{\rho_R^2 + \rho_X^2} – \text{модуль питомого магнітного}$$

опору, м/Гн;



$$\rho_X = X_m \frac{S}{l} = \frac{P_M S}{\Phi_{0m}^2 l \pi \cdot f} = \rho_Z \sin \delta_m, \rho_R = R_m \frac{S}{l} = \sqrt{\rho_Z^2 - \rho_X^2} = \rho_Z \cos \delta_m$$

– уявна і дійсна складові питомого магнітного опору, м/Гн.

### 4.3 Деякі магнітні матеріали

Магнітні матеріали можна розділити на три основні групи – низькочастотні магнітно-м'які, високочастотні магнітно-м'які і магнітно-тверді матеріали.

#### 4.3.1 Низькочастотні магнітно-м'які матеріали

Магнітні матеріали з малим значенням коерцитивної сили  $H_c \ll 4000$  А/м, великою магнітною проникністю  $\mu_a$ , відносно великим питомим електричним опором  $\rho$  і малими втратами на перемагнічування називають магнітно-м'якими. Низькочастотні магнітно-м'які матеріали застосовують для виготовлення магнітопроводів електричних машин, трансформаторів та інших пристроїв, в яких використовується змінний магнітний потік частотою від нуля (постійний магнітний потік) до декількох тисяч герц.

**Технічно чисте залізо** містить невелику кількість (менше 0,1 %) домішок вуглецю, сірки, марганцю, кремнію та інших елементів, які погіршують його магнітні властивості. Через низький питомий опір ( $\rho = 0,1$  мкОм·м) технічно чисте залізо використовують зазвичай в постійному магнітному полі – для виготовлення магнітопроводів електричних машин постійного струму, полюсних наконечників електромагнітів та електровимірювальних приладів. У таблиці 4.1 наведені основні властивості декількох різновидів заліза.

**Кремениста електротехнічна сталь** – це сплав заліза з кремнієм. Наявність кремнію підвищує питомий електричний опір, що зменшує втрати на вихрові струми. Крім того, кремній сприяє виділенню вуглецю у вигляді графіту, а також майже повному розкисленню сталі, тобто переведенню кисню на шлак (кремнезем). Це призводить до збільшення  $\mu_{rn}$  та зменшення  $H_c$ . З іншого боку, наявність кремнію призводить до зменшення індукції насичення  $B_s$  та погіршення механічних

Таблиця 4.1 – Основні магнітні властивості заліза [5]

Різновид заліза	Вміст домішок, %		Магнітні властивості		
			Відносна магнітна проникність		Коерци- тивна сила $H_c$ , А/м
	Вуглець	Кисень	Почат- кова $\mu_{rn}$	Мак- сима- льна $\mu_{rm}$	
Технічно чисте	0,02	0,06	250	7000	64
Електролітичне	0,02	0,01	600	15000	28
Карбонільне	0,005	0,005	3300	21000	6,4
Електролітичне, яке переплавлене у вакуумі	0,01	-	-	61000	7,2
Яке відпалене у водні	0,005	0,003	6000	200000	3,2

властивостей (підвищується твердість та крихкість). Тому концентрація кремнію в сталі не повинна перевищувати 4,8 %.

Листи кременистої сталі виготовляють прокаткою заготовок у нагрітому чи холодному стані. Тому розрізняють гарячекатану та холоднокатану кременисті сталі. У процесі холодної прокатки (з великим обтиском та особливою термічною обробкою) одержують текстуровану сталь крупнокристалічної будови, в листах якої кристали орієнтовані осями легкого намагнічування у напрямку прокатки. Магнітні властивості такої сталі в напрямку прокатки значно кращі порівняно з гарячекатаною. Застосування холоднокатаних текстурованих сталей вимагає такої конструкції магнітопроводу, в якій магнітний потік проходить у напрямку найкращих магнітних властивостей, тобто в напрямку прокатки.

Сталь електротехнічна тонколистова (товщиною 0,1–1мм) випускається у вигляді листів чи рулонів, маркується чотирма цифрами [8]. Перша цифра означає клас, тобто структурний стан та вид прокатки (1 – гарячекатана ізотропна; 2 – холоднокатана ізотропна; 3 – холоднокатана анізотропна з ребровою текстурою; 5 – холоднокатана ізотропна з площинною кубічною текстурою). Друга цифра означає приблизну концентрацію кремнію (0 – до 0,4 %; 1 – 0,4...0,8 %; 2 – 0,8...1,8 %; 3 – 1,8...2,8 %; 4 – 2,8...3,8 %; 5 – 3,8...4,8 %). Третя цифра означає групу

за основними нормованими (гарантованими) характеристиками (0 – питомі магнітні втрати на перемагнічування  $p_{1,7/50}$  при магнітній індукції  $B_m=1,7$  Тл та частоті  $f=50$  Гц; 1 –  $p_{1,5/50}$  при  $B_m=1,5$  Тл та  $f=50$  Гц; 2 –  $p_{1,0/400}$  при  $B_m=1,0$  Тл та  $f=400$  Гц; 4 –  $p_{0,5/3000}$  при  $B_m=0,5$  Тл та  $f=3000$  Гц; 6 – магнітна індукція  $B_{0,4}$  у слабких магнітних полях при напруженості поля  $H=0,4$  А/м; 7 – магнітна індукція  $B_{10}$  у середніх магнітних полях при напруженості поля  $H=10$  А/м). Четверта цифра визначає порядковий номер типу сталі (з поліпшенням магнітних властивостей у міру зростання цього номера від 1 до 8).

Максимальна відносна магнітна проникність гарячекатаних сталей (клас 1)  $\mu_{rm}=3000\dots10000$ , холоднокатаних (клас 3)  $\mu_{rm}>40000$ . Питомі магнітні втрати в сталі товщиною 0,35 мм: класу 1 (сталь 1513)  $p_{1,5/50}=2,5$  Вт/кг; класу 2 (сталь 2411)  $p_{1,5/50}=3,0$  Вт/кг; класу 3 (сталь 3414)  $p_{1,5/50}=1,1$  Вт/кг. Електротехнічну сталь застосовують в електричних машинах, апаратах та приладах, які працюють в середніх та сильних магнітних полях на змінному струмі промислової частоті (50 Гц) та при підвищеній частоті (400, 800 Гц).

**Пермалой** – це сплав заліза з нікелем, який має високу магнітну проникність (особливо в слабких магнітних полях) та малу коерцитивну силу. Високо–нікелеві пермалої мають вміст нікелю 70...80 %, а низько–нікелеві – 40...50 %. Пермалої, наприклад, 79НМ, 80НХС маркуються так: число означає процентний вміст нікелю, буква Н визначає нікель, М – марганець, Х – хром, С – кремній, К – кобальт, Д – мідь, П – з прямокутною петлею гістерезису. Низько–нікелеві пермалої (45Н, 50Н, 50НХС) мають такі властивості:  $\mu_{rn}=1700\dots3200$ ;  $\mu_{rm}=15000\dots35000$ ;  $H_c=8\dots32$  А/м;  $B_m=1,0\dots1,5$  Тл;  $\rho=0,45\dots0,9$  мкОм·м. Високо–нікелеві пермалої (79НМ, 80НХС, 76НХД) мають такі властивості:  $\mu_{rn}=16000\dots35000$ ;  $\mu_{rm}=5000\dots22000$ ;  $H_c=1,0\dots5,2$  А/м;  $B_m=0,65$  Тл;  $\rho=0,55$  мкОм·м. Пермалої разом з хорошими магнітними властивостями мають і недоліки – це дефіцит нікелю, потребують складної термообробки, під дією механічного напруження магнітні властивості помітно погіршуються, нижчі значення магнітної індукції насичення  $B_s$  та питомого електричного опору  $\rho$  порівняно з електротехнічною сталлю. Сплави виготовляють у вигляді холоднокатаних стрічок товщиною 0,02...2,5 мм, гарячекатаних та кованих прутків діаметром 8...10

мм. Застосовують пермалої для виготовлення осердя малогабаритних трансформаторів, дроселів, імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів, магнітних екранів.

**Альсифер** – сплав заліза Fe (84,9 %) з кремнієм Si (9,5 %) та алюмінієм Al (5,6 %). За своїми основними властивостями альсифер майже не поступається високо–нікелевим пермалоєм:  $\mu_{rn}=35000$ ;  $\mu_{rm}=120000$ ;  $H_c=1,8$  А/м;  $B_m=1,8$  Тл;  $\rho=0,8$  мкОм·м. Але через труднощі одержання точного складу компонентів промислові альсифери мають значно гірші показники. Через підвищену твердість та крихкість альсиферу вироби з нього виготовляють шляхом лиття з товщиною стінки не менше 2 мм.

**Аморфні сплави** містять один або декілька перехідних металів (залізо Fe, нікель Ni, кобальт Co) у кількості 75...85 % як основну складову та металоїд – склоутворювач (бор B, вуглець C, кремній Si, фосфор P) у кількості 15...20 %. Аморфні сплави містять легуючі метали (хром Cr, тантал Ta, ванадій V, марганець Mn), які надають їм специфічних властивостей. Аморфні сплави формують при дуже швидкому охолодженні, коли частинки не встигають вишикуватися в кристалічну структуру. За властивостями аморфні сплави близькі до пермалоїв, але менше піддаються впливу механічних напружень, мають високу корозійну стійкість та міцність при збереженні пластичності. При цьому питомий електричний опір аморфних сплавів у 2...3 рази більший, ніж у пермалоїв, що значно зменшує втрати на вихрові струми. Завдяки відносно простоті технології виготовлення аморфні сплави набули широкого застосування.

#### **4.3.2 Високочастотні магнітно-м'які матеріали**

**Магнітодіелектрик** – це пластична маса, яку пресують з використанням діелектрика як сполучного (фенол-формальдегідна смола, полістирол, бакеліт, нітролаки, скло) і порошку магнітно–м'якого феромагнетику як наповнювача (альсифер, пермалой, карбонільне залізо). Магнітодіелектрики мають дуже великий питомий електричний опір, і тому їх використовують при високих частотах ( $f=0,1...100$  МГц). З іншого боку, наявність проміжків між феромагнітними частинками суттєво знижує магнітну проникність матеріалу ( $\mu_r = 10...250$ ) і магнітну індукцію насичення ( $B_s=0,3...0,4$ Тл). З магнітодіелектриків

виготовляють кільцеві, циліндричні та броньові осердя для роботи в слабких високочастотних магнітних полях.

**Магнітно-м'які ферити** – це хімічні сполуки оксиду заліза  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  з оксидами деяких металів відповідно до формули  $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , де Me - символ двовалентних металів (марганцю Mn, нікелю Ni, цинку Zn, кобальту Co). Ферити поєднують хороші магнітні властивості з надзвичайно високим питомим електричним опором, який в  $10^6 \dots 10^{11}$  разів більший відносно металевих феромагнетиків. При виготовленні феритових виробів попередньо одержують порошок із тонкоподрібнених, перемішаних і попередньо обпалених оксидів відповідних металів. До порошку додають пластифікатор та одержаної маси пресують під великим тиском вироби потрібної форми, які обпалюють при температурі  $1100 \dots 1400^\circ\text{C}$ .

Початкова магнітна проникність магнітно-м'яких феритів  $\mu_{rn}$  коливається від декількох одиниць до 20000, максимальна магнітна проникність  $\mu_{rm} \approx 35000$ , коерцитивна сила  $H_c = 8 \dots 2240$  А/м, індукція насичення  $B_s = 0,08 \dots 0,5$  Тл, тангенс кута магнітних втрат  $\text{tg} \delta_m = 0,005 \dots 0,1$ . Питомий електричний опір феритів великий ( $\rho = 0,001 \dots 10^{10}$  Ом·м), і тому магнітні втрати від вихрових струмів дуже малі. Більшість феритів мають малі втрати на гістерезис.

Найбільш поширені у використанні ферити: марганцево-цинкові, нікелево-цинкові, літієво-цинкові. Маркування феритів (наприклад, 20000НМ, 600НН, 20ВЧ2): перше число – початкова магнітна проникність, подальші букви позначають частотний діапазон роботи: Н – низькочастотні ферити ( $f = 0,1 \dots 50$  МГц), ВЧ – високочастотні ферити ( $f = 50 \dots 600$  МГц). Далі буквами позначається склад фериту: М – марганцево-цинковий, Н – нікелево-цинковий, Л – літієво-цинковий. Подальші цифри означають різновид фериту.

Магнітно-м'які ферити використовують для виготовлення осердя високочастотних котушок індуктивності, трансформаторів, магнітних антен, деталей відхиляючих систем телевізійних трубок і багатьох інших пристроїв високочастотної (більше 1000 Гц) та імпульсної техніки

### 4.3.3 Магнітно–тверді матеріали

Матеріали з дуже великою коерцитивною силою  $H_c$  називають магнітно-твердими. Вони намагнічуються чи перемагнічуються в дуже сильних магнітних полях і використовуються в основному для виготовлення постійних магнітів. Магнітно-твердими умовно вважають матеріали, в яких  $H_c > 4$  кА/м. У кращих магнітно-твердих матеріалів  $H_c > 500$  кА/м. Магнітно-тверді матеріали поділяються на леговані мартенситні сталі, литі магнітно-тверді сплави, металопорошкові магніти і магнітно-тверді ферити.

#### *Крива розмагнічування і щільності магнітної енергії*

Основними характеристиками магнітно-твердих матеріалів є коерцитивна сила  $H_c$ , залишкова магнітна індукція  $B_r$ , а також крива розмагнічування  $B(H)$  як частина граничної петлі гістерезису (рис. 4.2) і крива щільності енергії магнітного поля  $w_m = B \cdot H / 2$  (1.27) в повітряному проміжку  $l$  (в робочому просторі) постійного магніту (рис. 4.8).

Щільність енергії магнітного поля  $w_m$  у повітряному проміжку суттєво залежить від величини цього проміжку  $l$ . При замкненому стані магнітного кола постійного магніту, коли  $l=0$  і  $B=B_r$ , магнітна енергія в проміжку нульова через нульове значення  $H$ . При дуже великому проміжку, коли  $l=\text{max}$  і  $H=H_c$ , магнітна енергія в проміжку також практично нульова через майже нульове значення  $B$ . Отже, при деякій (оптимальній) величині проміжку  $l=L$ , коли  $B=B_L$  і  $H=H_L$ , щільність магнітної енергії в робочому просторі сягає свого максимуму ( $w_m = w_{mL} = \text{max}$ ).

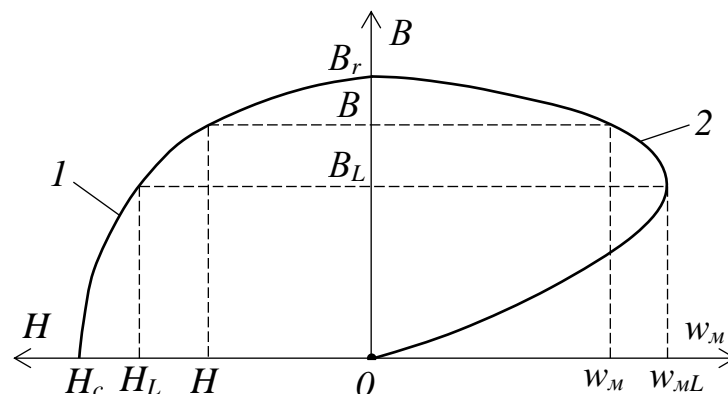


Рисунок 4.8 – Криві розмагнічування (1) і щільності енергії магнітного поля (2)

Для характеристики магнітно-твердих матеріалів використовують добуток  $B_L \cdot H_L$  або коефіцієнт опуклості  $\gamma$  кривої розмагнічування [5]:

$$\gamma = \frac{B_L \cdot H_L}{2B_r \cdot H_c} \quad (4.17)$$

**Легована мартенситна сталь** – найбільш простий і доступний матеріал для виготовлення постійних магнітів. Ця сталь легується домішками хрому Cr (1,3...10 %), вольфраму W (0...6,2 %), кобальту Co (0...16,5 %) і молібдену Mo (0...1,7 %). Її основні магнітні властивості:  $H_c=4,6...13,6$  кА/м,  $B_r=0,8...1,0$  Тл,  $w_{ML}=1...4$  кДж/м<sup>3</sup>. Ці властивості гарантуються після термообробки мартенситної сталі і 5-годинної структурної стабілізації в кип'ячій воді [5]. Леговані мартенситні сталі мають обмежене використання через їх невисокі магнітні властивості. Головна перевага мартенситних сталей – невисока ціна і простота механічної обробки.

**Литі магнітно-тверді сплави** – це сплави заліза Fe з алюмінієм Al і нікелем Ni (сплави альні) з додаванням кремнію Si (альнісі) або кобальту Co (альніко або магніко). Після спеціальної обробки ці сплави отримують такі властивості [5]:  $H_c=40...87$  кА/м,  $B_r=0,5...1,33$  Тл,  $w_{ML}=3,6...26,4$  кДж/м<sup>3</sup>,  $\gamma=0,34...0,74$ . Литі магнітно-тверді сплави за своїми магнітними властивостями в декілька разів кращі за леговані мартенситні сталі. Основним їх недоліком є труднощі виготовлення виробів з точними розмірами через підвищену твердість і крихкість.

**Металопорошкові магніти** виготовляють методами порошкової металургії. Існує два різновиди цих магнітів – металокерамічні і метало-пластичні. Металокерамічні магніти виготовляють шляхом пресування дрібнодисперсного порошку литого магнітно-твердого сплаву з подальшим спіканням при високих температурах аналогічно процесу відпалу кераміки. Металопластичні магніти виготовляють із зерен литого магнітно-твердого сплаву, скріплених сполучним, аналогічно виготовленню пластмасових деталей. Металопорошкові магніти використовують при масовому виготовленні деталей за достатньо точними розмірами, які не потребують подальшої механічної обробки.

Металокерамічні магніти мають механічну міцність, що в декілька разів перевищує механічну міцність литих магнітно-твердих сплавів, але на 10...20 % гірші магнітні властивості. Наприклад, з порошку магніко (8 % Al+15 % Ni+24 % Co+3 % Cu) виробляють металокерамічні магніти з такими властивостями [5]:  $H_c=50$  кА/м,  $B_r=1,0$  Тл,  $w_{ML}=11,7$  кДж/м<sup>3</sup>,  $\gamma=0,47$ . Дуже велику коерцитивну силу  $H_c$  мають металокерамічні магніти на основі сплавів кобальту Co (61,5...64 %) з рідкоземельними металами (36...38,5 %) – самарієм Sm і празеодімом Pr [5] у яких  $H_c=500...560$  кА/м,  $B_r=0,77...0,9$  Тл, просторі  $w_{ML}=55...72$  кДж/м<sup>3</sup>.

Металопластичні магніти за своїми магнітними властивостями суттєво поступаються литим магнітно-твердим сплавам через велику кількість немагнітного сполучного. Наприклад, із зерен альні (15 % Al+24 % Ni+4 % Cu) виробляють металопластичні магніти з такими властивостями [5]:  $H_c=38$  кА/м,  $B_r=0,3$  Тл,  $w_{ML}=1,62$  кДж/м<sup>3</sup>,  $\gamma=0,28$ .

**Магнітно-тверді ферити** – це зазвичай барієві ферити ( $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ ). Розрізняють дві марки барієвих магнітів – ізотропні і анізотропні. Барієві ізотропні магніти, вироблення яких подібне магнітам із магнітно-м'яких феритів, мають такі властивості [5]:  $H_c=114...144$  кА/м,  $B_r=0,18...0,22$  Тл,  $w_{ML}=2,8...4,4$  кДж/м<sup>3</sup>. Барієві анізотропні магніти, виготовлення яких передбачає пресування в постійному магнітному полі напруженістю до 800 кА/м, мають такі властивості [5]:  $H_c=128...240$  кА/м,  $B_r=0,3...0,4$  Тл,  $w_{ML}=8,0...14,0$  кДж/м<sup>3</sup>. Барієві магніти виготовлять у вигляді шайб або тонких дисків, мають високу стабільність під впливом зовнішніх магнітних полів. Недоліком барієвих магнітів є низька механічна міцність, крихкість і сильна залежність магнітних властивостей від температури.

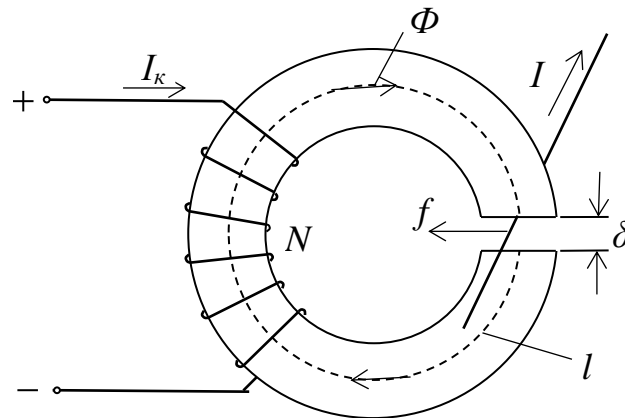
#### **4.4 Приклади завдань з визначення параметрів магнітних матеріалів**

##### **4.4.1 Розрахунок сили дії магнітного поля на провідник зі струмом**

**Завдання.** Визначити силу дії  $f$  магнітного поля на провідник зі струмом  $I=20$  А в повітряному проміжку електромагніту, а також



магнітну енергію  $W_m$  електромагніту. В намагнічувальній котушці електромагніту створений постійний електричний струм  $I_k=2$  А. Число витків котушки  $N=500$ . Феромагнітне осердя котушки має форму розіркненого кільця з повітряним проміжком  $\delta=2$  мм (рис. 4.9). Зовнішній діаметр феромагнітного кільця  $D_1=20$  см, внутрішній  $D_2=16$  см, товщина  $b=2$  см. Відносна магнітна проникність феромагнітного осердя  $\mu_r=1000$ .



**Рисунок 4.9** – Схема котушки з розіркненим кільцевим осердям

**Розв'язок.** Згідно із законом повного струму (1.20)

$$H \cdot l + H_{\delta} \cdot \delta = I_k \cdot N,$$

де  $H = \frac{B}{\mu_a}$  – магнітна напруженість в кільці, А/м;

$\mu_a = \mu_r \mu_0$  – абсолютна магнітна проникність феромагнітного осердя;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – абсолютна магнітна проникність повітря;

$B$  – магнітна індукція у феромагнітному кільці і повітряному проміжку, Тл;

$$l = \frac{\pi \cdot (D_1 + D_2)}{2 - \delta} = \frac{\pi \cdot (0,2 + 0,16)}{2 - 0,002} = 0,5632 \text{ м} \text{ – середня довжина магнітних силових ліній кільцеподібного феромагнітного осердя;}$$

$H_{\delta} = \frac{B}{\mu_0}$  – магнітна напруженість у повітряному проміжку, А/м.

Магнітна індукція  $B$  у повітряному проміжку

$$B = \frac{I_k N \mu_0}{\frac{l}{\mu_r} + \delta} = \frac{2 \cdot 500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{\frac{0,5632}{1000} + 0,002} = 0,49 \text{ Тл.}$$

Силу дії магнітного поля на провідник зі струмом у повітряному проміжку електромагніту можна розрахувати за формулою Ампера (1.15), тобто

$$f = I \cdot b \cdot B \cdot \sin \alpha = 20 \cdot 0,02 \cdot 0,49 \cdot 1 = 0,196 \text{ Н},$$

а енергію електромагніту – за формулами (1.26) або (1.27) як

$$W_m = \frac{\Phi N I_k}{2} = \frac{B S N I_k}{2} = \frac{0,49 \cdot 0,0004 \cdot 500 \cdot 2}{2} = 0,098 \text{ Дж};$$

$$W_m = \frac{B \cdot H}{2} V + \frac{B \cdot H_\delta}{2} V_\delta = \frac{B^2 S}{2 \mu_0} \left( \frac{l}{\mu_r} + \delta \right) =$$

$$\frac{0,49^2 \cdot 0,0004}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \left( \frac{0,5632}{1000} + 0,002 \right) = 0,098 \text{ Дж},$$

де  $S = 0,5 \cdot (D_1 - D_2) \cdot b = 0,5 \cdot (0,2 - 0,16) \cdot 0,02 = 0,0004 \text{ м}^2$  – площа поперечного перерізу феромагнітного кільця;

$\Phi = B \cdot S$  – магнітний потік, Вб.

$V = l \cdot S$  – об'єм феромагнітного осердя котушки електромагніту;

$V_\delta = \delta \cdot S$  – об'єм повітряного проміжку феромагнітного осердя.

#### **4.4.2 Розрахунок параметрів феромагнетику**

**Завдання.** Під час дослідження кільцеподібного зразка феромагнетику за схемою на рис. 4.5 були отримані такі показання електровимірювальних приладів: діюче значення струму  $I_1 = 0,2 \text{ А}$  (показання амперметра  $A_1$ ) та активної потужності  $P = 10 \text{ Вт}$  (показання ватметра  $W_1$ ), що споживає намагнічувальна обмотка з числом витків  $N_1 = 900$  при частоті  $50 \text{ Гц}$ ; діюче значення напруги  $U_2$  на вторинній обмотці з числом витків  $N_2 = 300$  (показання вольтметра  $V_2$ )  $U_2 = 25 \text{ В}$ . Активний опір намагнічувальної обмотки  $R_1 = 200 \text{ Ом}$ . Зразок феромагнетику має зовнішній діаметр  $D_1 = 20 \text{ см}$ , внутрішній  $D_2 = 16 \text{ см}$ , товщину  $b = 2 \text{ см}$  і щільність  $d = 7800 \text{ кг/м}^3$ . Визначити динамічну магнітну проникність  $\mu_a$ , магнітні втрати  $P_M$ , питомі магнітні втрати  $p_M$  і тангенс кута магнітних втрат  $\text{tg} \delta_m$  феромагнетику.

**Розв'язок.** Амплітуда магнітної індукції у феромагнетику (4.10)

$$B_m = \frac{U_2}{4,44fN_2S} = \frac{25}{4,44 \cdot 50 \cdot 300 \cdot 0,0004} = 0,938 \text{ Тл},$$

де  $S=0,5 \cdot (D_1-D_2) \cdot b=0,5 \cdot (0,2-0,16) \cdot 0,02=0,0004 \text{ м}^2$  – площа поперечного перерізу феромагнітного кільця.

Амплітуда еквівалентної синусоїди напруженості магнітного поля (4.15)

$$H_{me} = \frac{\sqrt{2}I_1N_1}{l} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot 900}{0,565} = 450 \text{ А/м},$$

де  $l = \frac{\pi(D_1+D_2)}{2} = \frac{\pi(0,2+0,16)}{2} = 0,565 \text{ м}$  – середня довжина магнітних силових ліній кільцеподібного феромагнітного зразка.

Абсолютна та відносна динамічна магнітна проникність феромагнетику (4.2)

$$\mu_{a\sim} = \frac{B_m}{H_m} = \frac{0,938}{450} = 0,002084 \text{ Гн/м}; \quad \mu_{r\sim} = \frac{\mu_{a\sim}}{\mu_0} = \frac{0,002084}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 1659.$$

Магнітні втрати у феромагнетику (4.13)

$$P_M = P_{W1} - I_1^2 R_1 = 10 - 0,2^2 \cdot 200 = 2 \text{ Вт}.$$

Питомі магнітні втрати (4.14)

$$p_M = \frac{P_M}{m} = \frac{P_M}{d \cdot V} = \frac{2}{7800 \cdot 0,0002261} = 1,134 \text{ Вт/кг},$$

де  $V = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2) \cdot b = \frac{\pi}{4}(0,2^2 - 0,16^2) \cdot 0,02 = 0,0002261 \text{ м}^3$  – об'єм зразка феромагнітного кільця.

Тангенс кута магнітних втрат (рис. 4.7, а)

$$\text{tg} \delta_m = \frac{I_{1a}}{I_{1p}} = \frac{0,02667}{0,1982} = 0,1346,$$

де  $I_{1a} = \frac{P_M}{U_0} = \frac{2}{75} = 0,02667$  А – активна складова струму  $I_1$ , яка зумовлена магнітними втратами  $P_M$  і спричиняє активну складову магніторушійної сили;

$U_0 = \frac{U_2 \cdot U_1}{N_2} = \frac{25 \cdot 900}{300} = 75$  В – основна складова прикладеної до котушки напруги;

$I_{1p} = \sqrt{I_1^2 - I_{1a}^2} = \sqrt{0,2^2 - 0,02667^2} = 0,1982$  А – реактивна складова струму  $I_1$ , яка спричиняє реактивну складову магніторушійної сили.

#### 4.5 Контрольні питання

1. Поясніть процес намагнічування матеріалу.
2. Яким фізичним законам підпорядковується процес намагнічування матеріалу?
3. Яким чином створюється магнітне поле у феромагнетик?
4. Назвіть головну відмінність феромагнетиків і феритів від інших матеріалів.
5. Які головні функції здатний виконувати феромагнетик?
6. Опишіть явище магнітострикції.
7. Які існують характеристики процесу намагнічування матеріалу?
8. Охарактеризуйте явище магнітної анізотропії.
9. Поясніть залежність процесу намагнічування феромагнетиків від температури.
10. Опишіть зв'язок між магнітною індукцією і напруженістю магнітного поля феромагнетиків.
11. Що являє собою основна крива намагнічування?
12. Поясніть залежність магнітного потоку і магнітної індукції від електричного струму в намагнічувальній обмотці.
13. Що таке процес магнітного насичення феромагнетиків?
14. Поясніть практичну цінність феромагнетиків.
15. У яких ситуаціях краще використовувати повітря або вакуум порівняно з магнітними матеріалами для створення магнітного поля?
16. Що таке абсолютна і відносна магнітна проникність?
17. У якій мірі магнітна проникність феромагнетиків може відрізнятися від магнітної проникності діелектрика або вакууму?

18. Чим обумовлена підвищена магнітна проникність феромагнетиків?
19. Що таке початкова і максимальна магнітна проникність?
20. Поясніть техніко-економічні переваги феромагнетиків з підвищеною магнітною проникністю.
21. Коли виникає потреба в перемагнічуванні магнітних матеріалів?
22. Поясніть поняття магнітного гістерезису.
23. Що таке втрати на гістерезис і як можна зменшити ці втрати?
24. Поясніть поняття коерцитивної сили і залишкової магнітної індукції.
25. Що таке втрати на вихрові струми і як можна зменшити ці втрати?
26. Опишіть відмінності динамічної петлі гістерезису від статичної петлі.
27. Що таке динамічна магнітна проникність?
28. Чим відрізняються магнітні втрати феромагнетика від втрат на гістерезис і вихрові струми?
29. Яким чином впливає частота перемагнічування феромагнетика на магнітні втрати?
30. У яких випадках підмагнічують феромагнетики постійною складовою струму чи напруженості магнітного поля?
31. Який існує взаємозв'язок між напругою джерела змінного струму і магнітною індукцією?
32. Поясніть причину залежності напруженості магнітного поля і електричного струму в намагнічувальній обмотці від величини напруги джерела живлення.
33. В яких випадках електричний струм у намагнічувальній обмотці може суттєво зростати при незначному збільшенні напруги, прикладеної до цієї обмотки?
34. Опишіть схему вимірювання основних магнітних характеристик феромагнетиків.
35. Як потрібно формувати електричні сигнали щоб отримати осцилограми динамічної петлі гістерезису?
36. Поясніть можливість визначення магнітних втрат за осцилограмою динамічної петлі гістерезису.
37. Як за показаннями амперметра і ватметра можна визначити магнітні втрати?

38. Поясніть можливість вимірювання магнітної проникності ферромагнетика за допомогою звичайних електровимірювальних приладів.
39. Опишіть поняття еквівалентної петлі гістерезису.
40. Як можна визначити амплітуду еквівалентної синусоїди напруженості магнітного поля і намагнічувальної сили за показаннями амперметра в колі намагнічувальної обмотки?
41. Що являють собою комплексний і питомий магнітні опори і як їх можна розрахувати?
42. Поясніть поняття дійсної і уявної складових магнітного опору і питомого магнітного опору.
43. Який існує зв'язок між уявною складовою питомого магнітного опору і магнітними втратами?
44. Охарактеризуйте схему заміщення котушки з ферромагнітним осердям.
45. Яким чином можна розрахувати параметри схеми заміщення котушки з ферромагнітним осердям?
46. Що таке магнітний потік розсіювання і як він впливає на параметри схеми заміщення котушки?
47. Поясніть векторну діаграму котушки з ферромагнітним осердям.
48. Як впливають магнітні втрати на фазовий зсув між намагнічувальним струмом і основним магнітним потоком?
49. Поясніть поняття кута магнітних втрат і методику визначення його величини.
50. Які з магнітних характеристик є найбільш важливими для магнітно-м'яких матеріалів?
51. Наведіть найбільш поширені та відомі магнітно-м'які низькочастотні матеріали.
52. Чим відрізняється електротехнічна сталь від звичайної (конструкційної) сталі?
53. Назвіть основні складові пермалою. Що таке аморфні сплави і які переваги вони мають над пермалоєм?
54. Назвіть основні складові альсиферу і наведіть технологію його отримання та область використання.
55. В яких діапазонах частот використовуються низькочастотні і високочастотні магнітно-м'які матеріали?
56. В чому полягає основна особливість магнітно-м'яких високочастотних матеріалів?

57. Назвіть основну відмінність магнітодіелектриків від звичайних діелектриків.

58. Наведіть основні складові феритів, технологію їх отримання та область використання.

59. Які магнітні характеристики є найбільш важливими для магнітно-твердих матеріалів?

60. Поясніть криву розмагнічування магнітно-твердих матеріалів.

61. Що таке щільність енергії магнітного поля в робочому просторі і чим вона важлива для магнітно-твердих матеріалів?

62. Яку послідовність значень коерцитивної сили та залишкової магнітної індукції можуть мати магнітно-тверді матеріали?

63. Чому неможливо використовувати магнітно-тверді матеріали в змінному магнітному полі?

64. Яким чином можна створити змінне магнітне поле за допомогою постійного магніту?

65. Які переваги мають металопорошкові магніти над литими з магнітно-твердих сплавів?

66. Назвіть основні складові магнітно-твердих феритів, технологію їх отримання та область застосування.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Півняк Г.Г. Електричні машини: Навчальний посібник [Текст] / Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. – Д.: Національний гірничий університет, 2003 – 327 с.
2. Oleksii V. Ivanov, Fedir P. Shkrabets, Jan Zawilak. Electrical generators driven by renewable energy systems. - Poland, Wroclaw, Wroclaw University of Technology, 2011.
3. Шкрабець Ф.П. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник [Текст] / Ф.П. Шкрабець, Д.В. Циценков, Ю.В. Куваєв, О.Б. Іванов, В.І. Панченко, А.А. Колб; Дніпропетровськ: –Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2004 – 515 с.
4. Шкрабець Ф.П. Збірник задач з електротехніки та основ електроніки [Текст] / Шкрабець Ф.П., Циценков Д.В. – Д.: Національний гірничий університет, 2006 – 258 с.
5. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. - 304 с.
6. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство: Підручник. – К.: «Видавництво Дельта», 2008. – 516 с.
7. Колесов С.Н., Колесов И.С. Электротехнические и конструкционные материалы: Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей вузов. – К.: Транспорт Украины, 2002.– 384 с.
8. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах / Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева - М.: Энергоатомиздат, 1986 - 368 с. ; 1987 - 464 с. ; 1988 - 728 с.
9. Методологічні особливості викладання навчальних дисциплін “Електротехнічні матеріали” та “Електроматеріалознавство” / Головченко А.С. //Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. - техн. зб. - 2013. - Вип.91. - С. 41-46.
10. Електроматеріалознавство: Підруч. / Л.В. Журавльова, В.М. Бондар. – К.: Грамота, 2006.-312 с.
11. Проектування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Циценков, О.Б. Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ«ДП», 2020. – 408 с.



Навчальне видання

**Головченко** Анатолій Семенович  
**Ципленков** Дмитро Володимирович  
**Колб** Андрій Антонович  
**Ніколенко** Анатолій Васильович

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

Навчальний посібник

Редактор Л.О. Чуїщева

Підписано до друку 10.11.2021. Формат 30 × 42/4.

Папір офсетний. Ум. друк. арк. 10,2.

Обл.-вид. арк. 10,2. Тираж 70 прим. Зам. \_\_\_\_.

Підготовлено до друку та видруковано  
у Національному технічному університеті "Дніпровська політехніка".  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842.  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.



9 789663 507637